

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta textilní

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2005

Markéta Berková

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta textilní

Obor 31-12-8

obor: Textilní materiálové inženýrství

zaměření: textilní materiály a zkušebnictví

Katedra textilních materiálů

**MECHANICKÉ VLASTNOSTI SÍŤOVIN
NÍZKÝCH DEFORMACÍ**

**MECHANICAL PROPERTIES OF THE
POLYAMID MONOFILAMENT FABRIC WITH
LOW DEFORMATION**

Markéta Berková

KTM - 428

Vedoucí diplomové práce: Ing. Vladimír Bajzík

Rozsah práce: 59

Počet stran textu: 48

Počet obrázků: 12

Počet tabulek: 10

Počet příloh: 11

Datum odevzdání: 7.1.2005

ANOTACE

Tato práce se zabývá objektivním měřením mechanických vlastností plošných textilií Kawabatovým hodnotícím systémem, měřením tloušťky tloušťkoměrem a dalšími metodikami, které vychází z měření drsnosti ve strojírenství. Pro experiment byly použity 100% polyamidové materiály (sítoviny) o různých jemnostech.

Cílem této práce je stanovení povrchových drsností jednotlivých sítovin přístrojem tloušťkoměr s použitím dvou snímačů, jejich vyhodnocení a srovnání s výsledky povrchových drsností vyhodnocených systémem KES.

Ke statistickému zpracování naměřených hodnot bylo využito programu QC.Expert, kterým byl vyhodnocena, analýza rozptylu, Spearmanův koeficient pořadí a lineární regrese.

ABSTRACT

This diploma thesis is concerned objective measurement of the mechanical properties of fabric with Kawabata's evaluation system, measurement of thickness with thickness meter and another methods, which results from roughness measurement in the mechanical engineering. For the experiment were used 100% polyamide monofilaments materials (meshes) with different fineness.

The aim of this work is to determine the surface roughness of particular meshes using measuring device thickness meter, their evaluation and comparing with the results of surface roughness evaluated by the KES system.

For statistical processing of the measured values was utilized program QC.Expert, which was used for evaluation of the analysis of variance, Spearman's rank correlation coefficient and linear regression.

Místopřísežně prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracovala samostatně s použitím uvedené literatury.

V Liberci dne 7.1.2005

.....

Markéta Berková

Prohlášení

Byla jsem seznámena s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména §60 (školní dílo).

Beru na vědomí, že TUL má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé diplomové práce a prohlašuji, že **souhlasím** s případným užitím mé diplomové práce (prodej, zapůjčení apod.)

Jsem si vědoma toho, že užít své diplomové práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem TUL, která má právo ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených univerzitou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše).

Beru na vědomí, že se svou diplomovou práci mohu vyzvednout v Univerzitní knihovně TUL po uplynutí pěti let po obhajobě.

V Liberci dne 7.ledna.2005

.....

Podpis

Markéta Berková

Vyhlídká 463

542 33, Rtně v Podkrkonoší

Poděkování

Ráda bych tímto poděkovala vedoucímu své diplomové práce Ing. Vladimíru Bajzíkovi, za odborné vedení, za podnětné rady a poskytnuté materiály, Ing. Karlu Kupkovi za pomoc při řešení experimentálních problémů a Ing. Jitce Novákové za odbornou pomoc.

Dále děkuji rodičům a bratrovi za materiální pomoc a psychickou podporu při studiu a při psaní této práce.

Seznam použitých symbolů a zkratk:

| | |
|-----------------|---|
| KES | Kawabatův hodnotící systém |
| AFM | mikroskopie atomových sil |
| LT | linearita |
| WT | deformační energie |
| RT | pružnost |
| WT' | energie ve zpětné fázi |
| 2HB | moment hystereze |
| B | tuhost v ohybu |
| G | tuhost ve smyku |
| 2HG | hystereze při úhlu smyku $\phi = 0,5^\circ$ |
| 2HG5 | hystereze při úhlu smyku $\phi = 5^\circ$ |
| MIU | střední hodnota koeficientu tření |
| MMD | směrodatná odchylka koeficientu tření MIU |
| SMD | směrodatná odchylka geometrické drsnosti |
| LC | linearita |
| WC | energie potřebná ke stlačení |
| RC | pružnost |
| MAD | průměrná absolutní odchylka profilu |
| s, SD | směrodatná odchylka |
| SD ² | rozptyl |
| CV | variační koeficient výšky profilu |
| F | síla |
| ε | bezrozměrná veličina tažnosti |
| ε_m | maximální hodnota tažnosti |
| F _m | maximální hodnota síly |
| F' | tahová síla ve zpětné fázi |
| μ | koeficient tření |
| x | posun stykače po povrchu vzorku |
| X | hodnocená délka posunu |
| T | tloušťka vzorku v místě x |
| \bar{T} | průměrná hodnota tloušťky T |

| | |
|---------------------|--|
| P, p | tlak |
| MP | průměrná výška píků |
| MS | průměrná směrnice profilu |
| MV | průměrná hloubka sedel |
| PS | průměrný čtverec směrnice profilu |
| PC | průměrná křivost profilu |
| TP | průměrná odchylka mezi pěti nejvyššími hodnotami píků a pěti nejnižšími hodnotami sedel |
| SHV | dráha kolísání povrchové výšky (z anglického surface height variation) |
| SFV | dráha kolísání síly potřebné k pohybu břitu po povrchu textilie (z anglického surface force variation) |
| D | fraktální rozsah |
| D_F | průměrná hodnota fraktálního rozměru |
| D_{Fp} | počáteční hodnota fraktálního rozměru |
| \bar{d} | aritmetický průměr průměru monofilu |
| R_a | průměrná hodnota výšek povrchu |
| $R(d_j)$ | funkce popisující proměnlivost tloušťky |
| $R_{a(geom.)}$ | geometrický průměr hodnoty výšek povrchu |
| T_m | průměrná jemnost monofilu |
| D | dostava síťoviny |
| n | počet měření |
| d | průměr monofilu |
| v_d | variační koeficient |
| ρ | měrná hmotnost |
| y_{ij} | zdroj variability výsledků měření |
| μ_i | skutečná hodnota výsledků analýz |
| ε_{ij} | náhodná chyba |
| μ_c | celkový průměr všech úrovní |
| α_i | efekt i-té úrovně faktoru |
| μ_0 | absolutní člen |
| α_i, β_j | složky odpovídající faktorům |

| | |
|------------------|--|
| λ_{ij} | efekt interakce úrovní |
| y | funkce závisle proměnné |
| x | funkce nezávisle proměnné |
| b_0 | absolutní regresní člen |
| b_1, b_m | neznámé regresní parametry |
| $F_i(x)$ | člen lineárního modelu |
| r | Spearmanův korelační koeficient pořadí |
| x_{1s}, x_{2s} | párové dvojice |
| n_s | počet párových dvojic |

OBSAH:

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | ÚVOD | 13 |
| 2 | TEORETICKÁ ČÁST | 15 |
| 2.1 | Měření mechanických vlastností při nízkých deformacích..... | 15 |
| 2.1.1 | KAWABATŮV HODNOTÍCÍ SYSTÉM TEXTILIÍ..... | 15 |
| 2.1.1.1 | Charakteristické hodnoty základních mechanických vlastností..... | 16 |
| 2.2 | Měření drsnosti povrchu | 22 |
| 2.2.1 | DOTYKOVÉ METODY MĚŘENÍ DRSNOSTI POVRCHU | 22 |
| 2.2.1.1 | Nepřímé kvantitativní měření drsnosti povrchu..... | 23 |
| 2.2.2 | BEZDOTYKOVÉ OPTICKÉ METODY MĚŘENÍ POVRCHU..... | 24 |
| 2.3 | Měřicí metody současnosti..... | 25 |
| 2.3.1 | MIKROSKOPIE ATOMOVÝCH SIL (ATOMIC FORCE MICROSCOPY)..... | 25 |
| 2.4 | Drsnost povrchu textilních materiálů | 27 |
| 2.4.1 | POPIS DRSNOSTI POVRCHU | 28 |
| 2.4.1.1 | Statistické parametry pro popis drsnosti povrchu | 28 |
| 3 | EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST | 32 |
| 3.1 | Popis hodnocených materiálů..... | 32 |
| 3.1.1 | MĚŘENÍ PRŮMĚRU MONOFILU | 33 |
| 3.1.2 | VÝPOČET JEMNOSTI SÍŤOVIN | 34 |
| 3.2 | Objektivní metody hodnocení povrchu plošných textilií..... | 34 |
| 3.2.1 | MĚŘENÍ DRSNOSTI TEXTILIÍ NA PŘÍSTROI TLOUŠŤKOMĚR..... | 34 |
| 3.2.2 | ZPRACOVÁNÍ NAMĚŘENÝCH DAT | 36 |
| 3.3 | KES – Kawabata Evaluation System..... | 36 |
| 3.3.1 | ZPRACOVÁNÍ NAMĚŘENÝCH HODNOT..... | 37 |
| 3.4 | Výpočet Spearmanova koeficientu..... | 38 |
| 3.5 | Analýza rozptylu – ANOVA..... | 38 |
| 3.5.1 | DVOUFAKTOROVÁ ANALÝZA ROZPTYLU | 39 |
| 3.6 | Regresní analýza | 40 |
| 4 | VÝSLEDKY A JEJICH DISKUZE | 41 |
| 4.1 | Statistické zpracování dat..... | 41 |
| 4.1.1 | ANALÝZA ROZPTYLU | 42 |
| 4.1.2 | VÝPOČET SPEARMANOVA KOEFICIENTU | 43 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 4.1.3 | REGRESNÍ ANALÝZA | 45 |
| 4.1.3.1 | Návrh modelů pro povrchové vlastnosti z KESu | 45 |
| 4.1.3.2 | Návrh modelů pro charakteristiky z tloušťkoměru | 53 |
| 5 | ZÁVĚR | 56 |
| 6 | LITERATURA | 58 |
| 7 | SEZNAM PŘÍLOH | 59 |

1 ÚVOD

Cílem této práce je vzájemné porovnání dvou objektivních metod pro měření drsnosti povrchu síťovin. Jedním z hlavních ukazatelů chování textilií jsou mechanické vlastnosti, které hrají při dalším jejich zpracování významnou roli. Proto je důležité umět rozpoznat ze statistických charakteristik jejich vlastnosti.

Povrchová drsnost je jednou z hlavních charakteristik plošných textilií, která je odpovědná za její omak a zaujímá významnou roli ve zkušebnictví textilií. S povrchovou drsností úzce souvisí tření a třecí síla a u mnoha textilií ovlivňuje jejich soudržnost a přilnavost k ostatním materiálům.

Síťovina je složená z monofilních "nekonečných" polyamidových vlasců vzájemně provázaných v pravém úhlu. Pod zvětšením, se jednotlivé monofily jeví jako samostatná jednolitá vlákna se stejným kruhovým průřezem (nepředpokládá se nestejnoměrnost).

Síťoviny v dnešní době zaujímají vysoké procento využití. Pro jejich vynikající vlastnosti se s nimi můžeme setkat kromě oděvnictví snad v každém odvětví průmyslu (ve zdravotnictví, oblasti tisku, sportu, zemědělství, potravinářství, stavebnictví). Jsou schopné bez porušení odolávat obrovskému napětí a umí je udržovat s velmi malou ztrátou, jsou pružné, mají nejvyšší odolnost v oděru. Mezi negativní vlastnosti polyamidu patří mírné bobtnání při styku s vodou a horší odolnost vůči silným kyselinám a UV záření.

V diplomové práci je popsána technika měření drsnosti (tloušťky) povrchu dvěma metodami. Hlavní součástí obou použitých měřících zařízení je snímač, který se po povrchu pohybuje konstantní rychlostí. Jako první je blíže popsán Kawabatův hodnotící systém – KES, který simuluje mechanické namáhání plošných textilií a vyhodnocuje jejich základní charakteristiky (tahové, smykové, ohybové, objemové a povrchové).

Jako druhý je popsán klasický přístroj na měření drsnosti textilií respektive tloušťky - tloušťkoměr. Drsnost povrchu každé síťoviny byla změřena dvěma snímači o průměrech 0,5 a 1 mm s pracovním označením slabý a silný. Vyhodnocení naměřených dat a výpočet charakteristických parametrů drsnosti probíhalo v programu MATLAB.

Statistické parametry charakterizující nerovnosti a tvar povrchu získané z tloušťkoměru pro silný a slabý snímač byly statisticky porovnány dvoufaktorovou

analýzou rozptylu. Pomocí lineární regrese byly vyhodnoceny povrchové vlastnosti z KESu i statistické parametry povrchu z tloušťkoměru v závislosti na jemnosti a dostavě. Velikost asociace mezi veličinami byla posuzována pomocí Spearmanova korelačního koeficientu. Výsledky jsou pro lepší přehlednost též vyneseny do grafů.

2 TEORETICKÁ ČÁST

2.1 Měření mechanických vlastností při nízkých deformacích

2.1.1 KAWABATŮV HODNOTÍCÍ SYSTÉM TEXTILIÍ

Tento hodnotící systém byl zkonstruován v roce 1974 společností Kato tech Co., podle hlavního návrhu profesora Suea Kawabaty z Univerzity v Kyotu.

Systém se skládá ze 4 přístrojů v rozsazích simulující běžné namáhání oděvních textilií při nošení:

1. tahového a smykového testovacího přístroje (KES-F1),
2. testovacího přístroje pro čistý ohyb (KES-F2),
3. testovacího přístroje pro stlačitelnost (KES-F3) a
4. testovacího přístroje pro povrch (KES-F4).

Umožňuje automatické objektivní hodnocení základních mechanických vlastností a vlastností povrchu (hlavně omaku) nejen u tkaniny, ale také u přízí, fólií a polymerních materiálů právě tak lehce a v krátkém čase.

Nedávno byl vyvinutý nový automatický model KES-FB, který je vylepšenou verzí systému KES-F. Každý z těchto přístrojů je spojen s hlavním blokovým zesilovačem a je-li to nezbytné, také s výpočtovým blokem. Lze také sestavit takový systém, kde všechny sady přístrojů jsou společně zapojeny k jednomu bloku hlavního zesilovače a k jednomu výpočtovému bloku [1].

Tento systém umožňuje testování pěti základních mechanických vlastností plošných textilií, kterým je možné získat 14 charakteristických hodnot popisujících materiál. 15-tou a 16-tou charakteristikou, které se používají při predikci omaku je tloušťka a plošná hmotnost.

Uvedené charakteristické hodnoty simulující v určitých mezích běžné namáhání oděvních textilií při nošení.

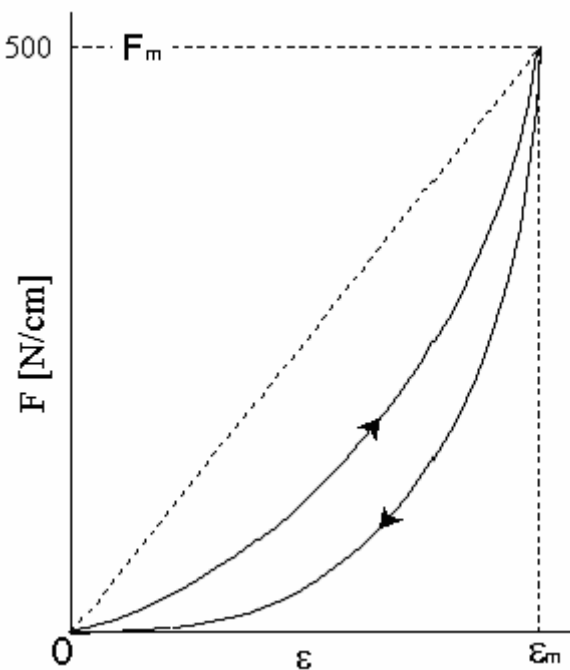
Na základě výše zmíněných charakteristik je možné stanovit celkovou hodnotu omaku tzv. THV (total hand value), která je uvedena v literatuře [2].

2.1.1.1 Charakteristické hodnoty základních mechanických vlastností

A. Tahové vlastnosti

Pro vyjádření charakteristik souvisejících s tahovým namáháním se vychází z experimentálně určené závislosti mezi relativním zatížením F [N/cm] a deformací ε [-] při tahovém namáhání do maximálního zatížení $F_m=4,9$ N/cm, kterému odpovídá transformace ε_m a odlehčení na nulovém zatížení. Pro měření tahových vlastností se používá vzorek obdélníkového tvaru o velikosti 5x20 cm. Obvykle získáme křivku zobrazenou na *obr. 2.1*. Z těchto křivek se určuje[2]:

- ideální deformační práce odpovídající elastickému tělesu $WOT = 0,5 \cdot F_m \cdot \varepsilon_m$ jako plocha trojúhelníku o vrcholech 0 , ε_m a F_m .
- deformační práce ve zpětné fázi (při odlehčení) je rovna $WT' = \int_0^{\varepsilon_m} F' d\varepsilon$, kde F' je relativní zatížení při odlehčování.



Obr. 2.1: Definice tahových charakteristik

Charakteristické hodnoty:

1. Linearita [-]

$$LT = WT / WOT \quad (1)$$

2. Deformační energie [N·cm/cm
- ²
-]

$$WT = \int_0^{\varepsilon_m} F d\varepsilon \quad (2)$$

3. Pružnost [%]

$$RT = \frac{WT'}{WT} \cdot 100 \quad (3)$$

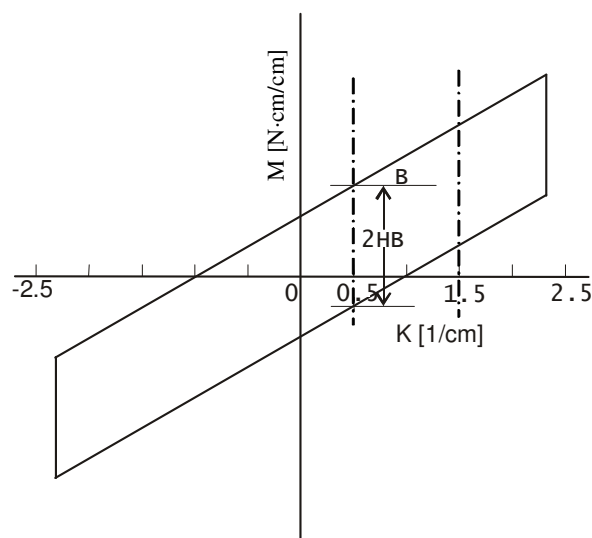
B. Ohybové vlastnosti

Vychází se z experimentální hysteréz křivky závislosti ohybového momentu na křivosti (viz. *obr.2.2*). Čisté ohyby jsou mezi křivostmi $K = (-2,5; 2,5 \text{ cm}^{-1})$ se stálou změnou rychlosti $0,5 \text{ cm}^{-1}/\text{s}$. Podélná délka vzorku může být v rozmezí od 2 do 20 cm, šířka je 1 cm, ve které je ohýbán. Vzorek je položen svisle, aby došlo k zabránění účinku gravitační síly. B je získáno ze sklonu křivky M-K, kde M je ohybový moment na jednotku délky vzorku [1].

Charakteristické hodnoty:

4. B je tuhost v ohybu na jednotku délky [N·cm
- ²
- /cm]

5. 2HB je moment hysterese na jednotku délky [N·cm/cm]



Obr. 2.2: Definice ohybových charakteristik

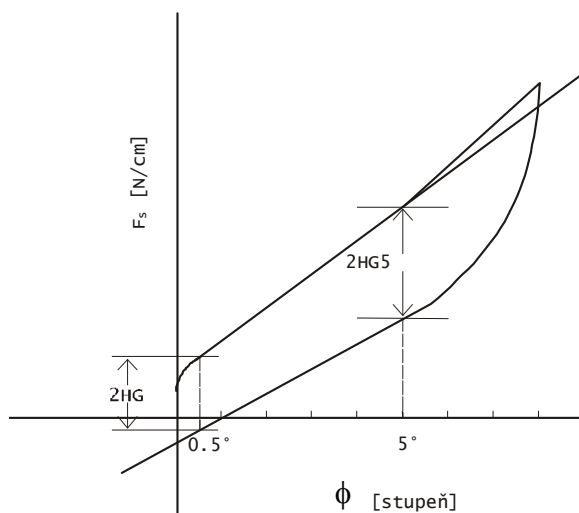
C. Smykové vlastnosti (obr. 2.3)

Vychází se z experimentální křivky závislosti smykové síly na úhlu. Kolmo na smykovou sílu vzorku působí konstantní napětí W . Velikost vzorku je 20x5 cm, dlouhá strana je střižena ve směru útku

Charakteristické hodnoty:

6. G je tuhost ve smyku [$\text{N/cm} \cdot \text{stupeň}$]
7. $2HG$ je hystereze při úhlu smyku $\phi = 0,5^\circ$ [N/cm]
8. $2HG5$ je hystereze při úhlu smyku $\phi = 5^\circ$ [N/cm]

G se odlišuje od definice smykového modulu v případě, že G je definováno jako smyková síla na jednotku délky/úhel smyku. Sklon křivky $F-\phi$ se rovná G a je standardně měřen mezi $\phi = 0,5^\circ$ a 5° . V případě, že v této oblasti není křivka lineární, bereme střední zkosení nad touto oblastí [1].



Obr. 2.3: Definice smykových charakteristik

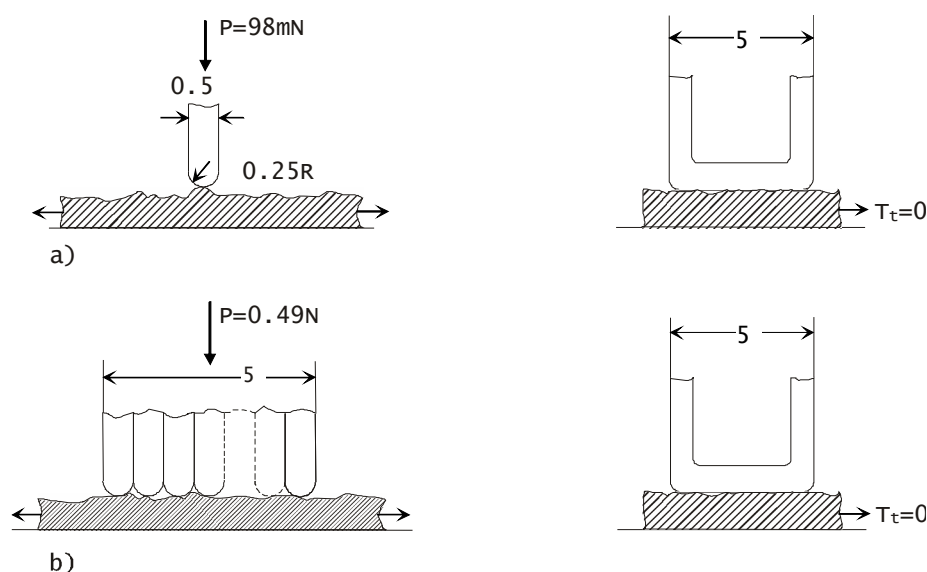
D. Povrchové charakteristiky

Princip měření drsnosti povrchu a povrchového tření je založený na získání profilu povrchu s použitím dotykového čidla – kontaktoru (stykače), který je hlavní součástí Kawabatova přístroje. Profil povrchu - *SHV* (surface height variation), který je blíže popsán v kapitole 2.4.1 je zaznamenáván na arch papíru.

Velikosti vzorků pro měření povrchových vlastností většinou bývají mezi 2 - 20 cm na délku a 0,5 - 3,5 cm na šířku.

Stykač pro měření povrchové drsnosti je zhotoven z ocelového drátu o průměru 0,5 mm. Vzorek se pohybuje v intervalu 2 cm konstantní rychlostí 1 mm/s. Drát je ohnutý jak je uvedeno na *obr. 2.4* a je zatěžován pružinou o kontaktní síle 9,8 N. Vzorek se pohybuje zleva doprava otáčením bubnu, na kterém je připevněný konec vzorku a zpět [1].

Povrchové tření se měří pomocí stejného stykače jako drsnost povrchu. Deset stykačů je spojeno dohromady (viz. *obr. 2.4*).



Obr. 2.4: Kontakory pro testování a) drsnosti povrchu, b) povrchového tření

Pro charakteristiku drsnosti se používá průměrná absolutní odchylka SMD (koresponduje s charakteristikou MAD, jak je uvedeno v kapitole 2.4.1.1).

Charakteristické hodnoty (*obr. 2.5*):

POVRCHOVÉ TŘENÍ:

9. MIU je střední hodnota koeficientu tření [-] a je dána vztahem:

$$MIU = \frac{1}{X} \int_0^x \mu dx. \quad (4)$$

10. MMD je směrodatná odchylka koeficientu tření MIU [-] a platí:

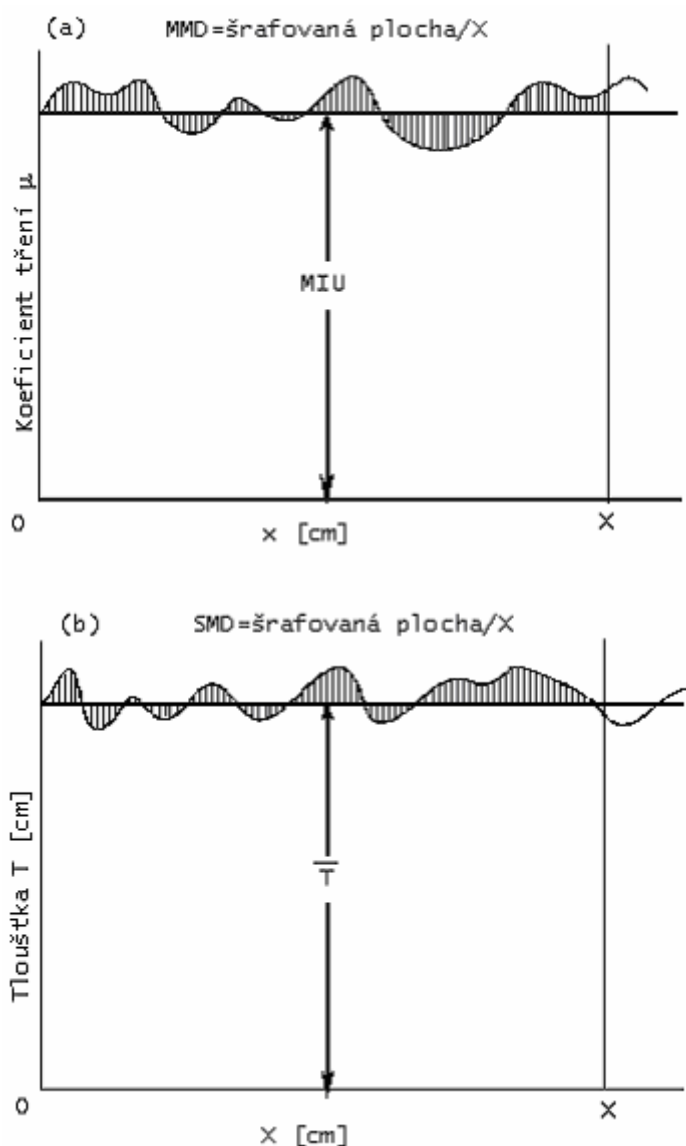
$$MMD = \int_0^x |\mu - \bar{\mu}| dx. \quad (5)$$

GEOMETRICKÁ DRSNOST:

11. SMD je směrodatná odchylka geometrické drsnosti (směrodatná odchylka tloušťky) [μm] a je definována jako:

$$SMD = \frac{1}{X} \int_0^x |T - \bar{T}| dx, \quad (6)$$

kde μ je koeficient tření v místě x , x je posun stykače po povrchu vzorku, X je hodnocená délka posunu (2 cm), T je tloušťka vzorku v místě x (měřená stykačem), \bar{T} je průměrná hodnota tloušťky T .



Obr. 2.5: Definice povrchových charakteristik a) povrchového tření, b) drsnosti povrchu

E. Objemové charakteristiky

Analogicky jako u tahového namáhání se vychází z experimentálně určené závislosti mezi relativním stlačením P [N/cm^2] a tloušťkou T [cm] z počáteční tloušťky T_0 při tlaku $0,0049 \text{ N}/\text{cm}^2$ do tloušťky T_m při maximálním tlaku $P_m = 0,49 \text{ N}/\text{cm}^2$ [2]. Efektivní rozměr vzorku je stlačená plocha kruhu o 2 cm^2 . Používá se vzorek o rozměrech $2,5 \times 2 \text{ cm}$, kde podélný směr je bráný buď podél osnovy nebo útku. Zatěžovací a odlehčovací tlaková křivka je na *obr. 2.6*.

Charakteristické hodnoty:

12. Linearita [-]

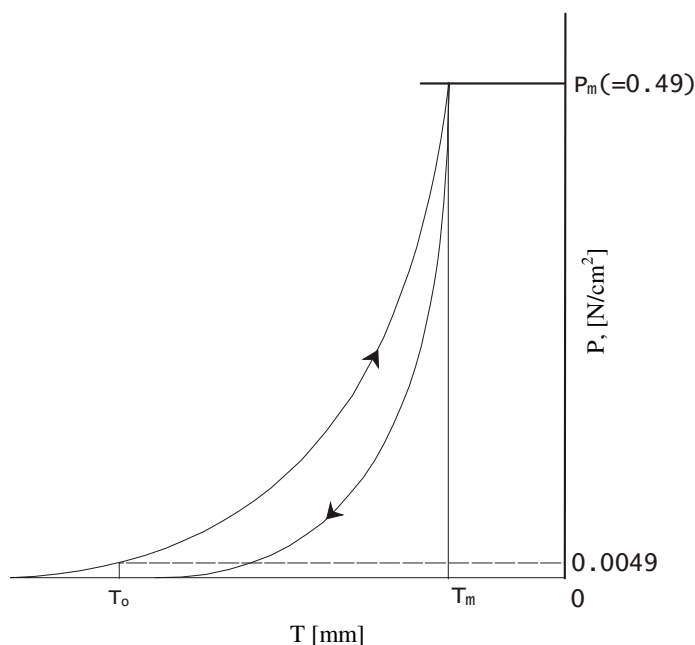
$$LC = WC / WOC \quad (7)$$

13. Energie potřebná ke stlačení [$\text{N} \cdot \text{cm}/\text{cm}^2$]

$$WC = \int_{T_m}^{T_0} P dT \quad (8)$$

14. Pružnost [%]

$$RC = WC' / WC \quad (9)$$



Obr. 2.6: Definice objemových charakteristik

Ideální práce při stlačení je $WOC = P_m \cdot (T_0 - T_m)/2$ a WC' je energie ve zpětné fázi daná tlakem ve zpětné $WC' = \int_{T_m}^{T_0} P' dT$.

F. Tloušťka a plošná hmotnost

Tloušťka T se měří při tlaku $0,5 \text{ N/cm}^2$, již při zjišťování objemových vlastností a uvádí se v mm. Plošná hmotnost se vyjadřuje hmotností na jednotku plochy [mg/cm^2].

Skupiny D a F nejsou mechanické vlastnosti, ale fyzikální vlastnosti a nepřímo souvisí s mechanickými vlastnostmi. Počet charakteristických hodnot, které znázorňují vlastnosti každé z těchto šesti skupin by měl být tak malý, jak je to možné, ale musí dostatečně vyjádřit jejich vlastnosti [1].

2.2 Měření drsnosti povrchu

Tradiční a jednou z nejdůležitějších součástí přístroje pro objektivní metody měření nerovností strojních součástí, je podobně jako u textilií, snímač, který opisuje profil povrchu materiálu.

Závažný problém při měření drsnosti povrchu nastává tehdy, je-li povrch snímán při malé rychlosti a dráze. Dráha snímání musí být dostatečně dlouhá, aby podala dostatek informací o drsnosti a dostatečně malá, aby zanedbala možnou vlnitost.

2.2.1 DOTYKOVÉ METODY MĚŘENÍ DRSNOSTI POVRCHU

Mezi nejrozšířenější přístroje pro měření drsnosti povrchu patří dotykové profilometry. Měření spočívá v posouvání hrotu s velmi malým zaoblením rovnoměrnou rychlostí po měřeném povrchu. Nerovnosti povrchu způsobují změny výškové polohy měřicího hrotu. Tyto změny se zaznamenávají ve tvaru profilogramů, u elektrických metod se převádějí na analogové změny napětí nebo indukčnosti. Změny elektrického signálu umožňují vyhodnocení jedné nebo více charakteristik drsnosti povrchu [3].

Jedním z nejuniverzálnějších přístrojů je dotykový profiloměr s mechanicko - elektrickým převodem. Je přesný, citlivý a umožňuje vyhodnocovat různé charakteristiky drsnosti povrchu a získat grafický záznam profilu.

Princip všech mechanicko - elektrických profiloměrů je v podstatě stejný. Změny polohy měřicího hrotu převádí měnič na analogové změny elektrického napětí

nebo indukčnosti. Podle konstrukce snímačů (měničů) se dělí elektrické profiloměry do dvou základních skupin:

- generátorového typu, kde pouze při pohybu měřícího doteku vzniká na výstupu snímače elektrické napětí úměrné rychlosti hrotu
- impedančního typu, kde změna polohy měřícího hrotu způsobuje analogovou změnu impedance elektrického obvodu. Zvětšený tvar měřeného profilu je úměrný změnám polohy měřícího hrotu. Jsou dnes používány nejčastěji, mezi ně patří elektroinduktivní snímače.

Jedním z nejdokonalějších profiloměrů je profiloměr typu Talysurf, pracující s optoelektrickým zpracováním odraženého světelného paprsku. Konečné zpracování signálu je elektronické [3].

2.2.1.1 Nepřímé kvantitativní měření drsnosti povrchu

U tohoto měření se porovnává kontrolovaná plocha se vzorovou komparačními přístroji, založenými na různých fyzikálních principech. Výsledkem je obvykle kvantitativní analogový údaj rozdílu drsnosti porovnávaných povrchů. Jsou známé přístroje na principu čistě mechanickém, komparátory pneumatické, elektrické induktivní a fotoelektrické. Pro názornost je popsán jeden z výše uvedených [3].

Mechanický komparátor

Příkladem mechanického komparátoru pro měření drsnosti povrchu je malý ruční přístroj Mercin 3. Princip tohoto indikátoru je založený na působení osově síly F na úzkou planžetu zakončenou dotykem ze slinutého karbidu, skloněnou pod malým úhlem φ k měřenému drsnému povrchu, kde dotyk po povrchu klouže. Při určitém kritickém úhlu sklonu (φ_k) se planžeta náhle prohne tento úhel se odečte relativně přesně v pětinasobném zvětšení na ukazateli ovládaném kyvadlem.

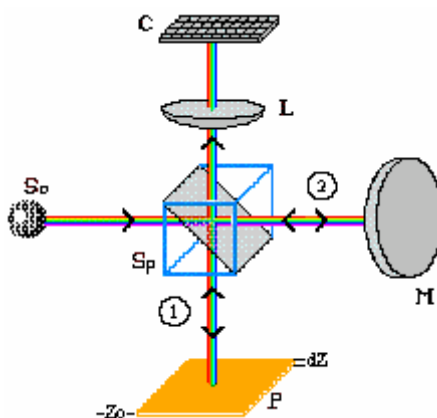
Velmi levně a jednoduše se tímto komparátorem měří součinitel tření, který lépe vyjadřuje výstupky profilu a aritmetické průměry několika měření určují ve většině případů s dostačující přesností stupeň drsnosti povrchu [3].

2.2.2 BEZDOTYKOVÉ OPTICKÉ METODY MĚŘENÍ POVRCHU

Do skupiny optických měřících metod patří přístroje založené na okamžité transformaci profilu. Umožňují kvantitativní měření drsnosti povrchu na principu světelného řezu, měření nosného podílu a dosud nejpřesnější interferenční metody. Výhodou optických metod je, že jsou bezdotykové a nepoškozuji kontrolovaný povrch a je možné měřit větší část povrchu. Výsledkem měření jsou zvětšené obrazy profilů šikmých řezů nerovností povrchu.

Interferenční metody měření drsnosti povrchu

Optické interferenční metody jsou metodami šikmého řezu. Lze jimi měřit nerovnosti povrchu menší než $1\ \mu\text{m}$, neboť tyto profily zjištěné profiloměry jsou do určité míry zkreslené zaoblením měřících hrotů.



Obr. 2.7: Michelsonův interferometr

Michelsonův interferometr je základem většiny interferenčních mikroskopů pro měření drsnosti povrchu. Na obr. 2.7 je znázorněn princip vzniku světelné interference, kde mezi sebou vzájemně interferují pouze dva odražené paprsky – metoda dvoupaprsková. Interferometr rozdělí svazek paprsků vycházejících ze zdroje světla S_0 do dvou koherentních paprsků 1 a 2. Jeden paprsek se odrazí od rovinného zrcadla (M) a druhý od měřené plochy (P). Polopropustná rovina hranolu (S_p) propouští oba odražené paprsky k anodové kameře (C) skrz čočku (L). Odražené paprsky se znovu interferují na dělicí rovině S_p . Je-li rozdíl drah paprsků roven polovině vlnové délky použitého monochromatického světla, vytvoří se v zorném poli interferenčního mikroskopu tmavé body, které se spojují v souvislé interferenční čáry [3].

2.3 Měřicí metody současnosti

Vývoj měření a hodnocení struktury povrchu vychází především z technických, ale i ekonomických aspektů uživatelského prostředí. Snahou výrobců je nabídnout ucelený měřicí systém, který splňuje jak technické požadavky, tak i požadavky uživatele.

V současné době se měřicí přístroje na měření drsnosti povrchu stále zdokonalují. Kvalita a úroveň měření se zvýšila především použitím vyspělé výpočetní techniky s programy umožňující okamžité a rychlé zpracování a vyhodnocení výsledků. Měřicí přístroje zaznamenávají profil povrchu bezkontaktně, což je velkou výhodou (nedochází k poškození povrchu zkoumaného materiálu). Významné místo v oblasti měření drsnosti povrchu zaujímají 3D souřadnicové systémy, optické profilometry, rastrovací mikroskopie (tunelová, elektronová, kapacitní), mikroskopie atomových sil a jiné.

2.3.1 MIKROSKOPIE ATOMOVÝCH SIL (ATOMIC FORCE MICROSCOPY)

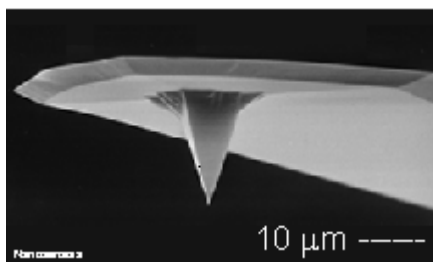
AFM je moderní experimentální metoda, umožňující snadnou charakterizaci povrchů. Můžou být zkoumány materiály, které mají tenké i tlusté povlaky, keramika, kompozity, skla, syntetické a biologické membrány, kovy, polymery a polovodiče. Použitím AFM nejen že získáme obraz povrchu v atomovém rozlišení, ale také měří sílu v nanonewtonech [4].

Tato metoda využívá malé sondy, která v těsné blízkosti povrchu mapuje topografii vzorku, tím se zařazuje do rodiny rastrovacích sondových mikroskopů (SPM - Scanning Probe Microscopy), obdobně jako tunelová mikroskopie.

U mikroskopie atomové síly jsou k detekci vzdálenosti sondy od povrchu využity meziatomární síly, které způsobují nepatrné deformace raménka sondy. Pomocí optické detekce laserovým paprskem je pak vyhodnocována poloha této sondy a topografie povrchu je dále softwarově zpracovávána.

Princip mikroskopu atomové síly (viz. obr.2.9)

Hlavním prvkem mikroskopu atomové síly je velmi jemný hrot (viz. obr. 2.8), upevněný na volném konci pružného raménka, které se posunuje po povrchu vzorku. Poloměr špičky tohoto hrotu je 10-50 μm , ale díky silám krátkého dosahu, působícím mezi několika nejbližšími atomy hrotu a povrchu můžeme u mikroskopie atomové síly dosáhnout teoreticky až atomového rozlišení. Hrot může být z různých materiálů, typickým je křemík, nebo na něm může být připevněna magnetická částice či molekula [5].



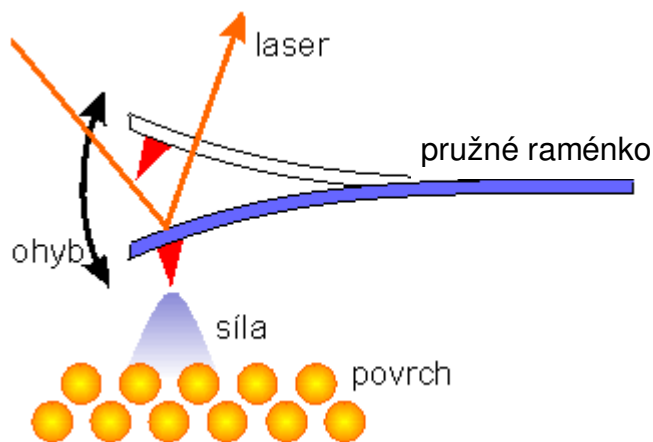
Obr. 2.8: Hrot a část raménka AFM

Veškeré posuny v osách x , y a z jsou při snímkování povrchu zajišťovány piezoelektrickými elementy. Měřitelné posuny po ploše vzorku mohou být menší než 0,1 nm. Mikroskop může pracovat ve dvou základních režimech: kontaktním a nekontaktním.

Při kontaktním režimu sleduje hrot, který je upevněn na volném konci poměrně málo tuhého raménka přímo topografii povrchu na základě detekce odpudivých sil, které ve velké blízkosti hrotu od povrchu působí. Změna v reliéfu povrchu se projeví jako změna průhybu raménka. Ta se detekuje laserovým paprskem, který svítí na zadní stranu raménka a odráží se na dělenou fotodiodu. Záporná zpětná vazba udržuje konstantní přítlak hrotu jeho oddalováním resp. přibližováním. Údaj o topografii se odvozuje právě z této zpětné vazby. S topografií můžeme zároveň detekovat také boční sílu způsobenou třením, různorodostí materiálů a dalšími vlivy [6].

Při druhém způsobu, tzv. nekontaktním, je raménko s hrotem rozkmitáno na rezonanční frekvenci (50 - 500 kHz) napětím přivedeným na piezoelektrický element ve směru kolmém k povrchu. Hrot se nachází dále od povrchu, ale v dosahu přitažlivých sil atomů povrchu. Detekuje se změna amplitudy nebo fáze kmitů (opět laserovým paprskem) při přiblížení nebo oddálení od povrchu v důsledku změny tlumení kmitů. I zde se využívá záporné zpětné vazby k udržení konstantního tlumení. Výhodou tohoto

módu je, že hrot nepřichází do přímého kontaktu s povrchem (nedochází k poškození vzorku). Díky tomu je možné používat hroty s menším vrcholovým úhlem a dosahovat tak vyššího rozlišení.



Obr. 2.9: Princip mikroskopie atomových sil

2.4 Drsnost povrchu textilních materiálů

Drsnost povrchu je významná charakteristika, která blízce souvisí s funkčními vlastnostmi výrobků. Využívá se jak pro hodnocení kvality výrobků, tak i pro vyjádření jejich použitelnosti. Zvláště v textilním oboru je drsnost jednou z hlavních částí omaku, komfortu a vzhledu. Proto je měření drsnosti povrchu důležitým krokem v řízení výroby.

Obecně má drsnost povrchu dva základní geometrické rysy:

- náhodné - povrch se mění náhodně a nelze ho popsat jednoduchou geometrickou formou,
- strukturní - povrch se mění v souladu s konstrukcí textilie a obvykle lze nalézt periodické opakování lokálních extrémů na SHV (experiment Kawabata).

Moderní metody jsou založeny na obrazovém zpracování profilu povrchu (Zhang a Gopalakrishnan, 1996). Povrchová nestejnoměrnost běžných textilií může být identifikována pomocí metod tření (Ajayi, 1992), metod kontaktního bříty (Ajayi, 1994 a Kawabata, 1980), postranním proudem vzduchu (Ajayi, 1988), krokovým tloušťkoměrem (Militký a Bajzík, 2000) nebo subjektivním hodnocením [7].

2.4.1 POPIS DRSNOSTI POVRCHU

Drsnost technických povrchů se měří pomocí dotykových metod, které vytváří profil povrchu tzv. dráhu kolísání povrchové výšky SHV (Vandenberg a Osborne, 1992). Tento profil charakterizuje proměnlivost tloušťky resp. výšky ve vybraném směru. Charakteristickým údajem pro drsnost je pak variační koeficient profilu povrchu (SHV). Pomocí variogramu (strukturální funkce) se odhaduje komplexnost (složitost) struktury povrchu. Rozdílnost struktury povrchu se člení na skupiny dle nízko nebo vysoko rozsahové závislosti.

Právě na relativní proměnlivosti variačního koeficientu (nebo jednoduše na směrodatné odchylce) jsou založeny standardní metody vyhodnocení profilu povrchu (analogie výpočtu hmotné nestejnomyšlnosti příze, Meloun, 1992).

K popisu drsnosti povrchu se také používá průměrná absolutní odchylka (MAD), která je klasickým přístupem popisné statistiky a je užitečná pro náhodné SHV, kde elementy SHV jsou vzájemně statisticky nezávislé. SHV profil několika měření různých povrchů textilií vykazuje značnou nepravidelnost (náhodnost). Popisně statistický přístup založený na předpokladu nezávislosti a normality vede k dvousým charakteristikám v případě, že SHV vykazuje nízko nebo vysoko rozsahové korelace (Meloun, 1992) [7].

2.4.1.1 Statistické parametry pro popis drsnosti povrchu

Řadu různých parametrů drsnosti je možné vyhodnotit z křivek SHV nebo SFV. Klasické parametry drsnosti jsou založeny na naměřených hodnotách $R(d_j)$, $j = 1 \dots M$ definovaných na délce vzorku L . Místa měření d_j jsou samozřejmě ekvidistantní (stejně vzdálené) a pak se $R(d_j)$ nahrazuje proměnnou R_j . Pro identifikaci pozice měření na vzorku je postačující znát vzdálenost mezi měřeními $d_s = d_j - d_{j-1} = L/M$ pro $j > 1$.

Mezi základní charakteristiky drsnosti, které jsou často používané v praxi patří [8]:

❖ Průměrná absolutní odchylka MAD: Tento parametr je roven střední absolutní odchylce povrchových výšek z průměrné hodnoty (R_a). Pro povrchový profil je dán vztah:

$$MAD = \frac{1}{M} \sum_j |R_j - R_a|. \quad (10)$$

Tento parametr se často používá při řízení jakosti, ale neumí rozlišit profily různých tvarů. Jeho statistické chování je známé pro případ, kdy R_j jsou nezávislé, shodně rozložené náhodné proměnné (to však pro velkou většinu povrchů neplatí).

❖ Směrodatná odchylka SD: je definována známým vztahem:

$$SD = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_j (R_j - R_a)^2} . \quad (11)$$

Její vlastnosti jsou známy pro případ, kdy R_j jsou nezávislé, shodně rozložené náhodné proměnné. Výhodou SD proti MAD je, že pro normálně rozložená data lze jednodušeji vypočítat interval spolehlivosti a realizovat statistické testy. SD je vždy větší než MAD a pro normálně rozložená data je $SD = 1.25 \cdot MAD$. Parametr SD je také nedostačující pro rozlišení profilů různých tvarů. Pro sledování určitých povrchů, které mají velké odchylky je proměnná SD méně vhodná než proměnná MAD.

❖ Variační koeficient výšky profilu CV: tato velmi používaná charakteristika je definována vztahem:

$$CV = \frac{SD}{R_a} . \quad (12)$$

❖ Průměrná výška píků MP: je počítána jako průměrná odchylka profilu nad referenční hodnotou R (často se volí $R = R_a$). Je dána jako průměrná hodnota píků P_i , $i = N_p$ kde:

$$P_i = R_i - R \text{ pro } R_i - R > 0 \quad \text{a} \quad P_i = 0 \text{ jinak.}$$

❖ Průměrná hloubka sedel MV: je počítána jako průměrná odchylka profilu pod referenční hodnotou R (často se volí $R = R_a$). Je dána jako průměrná hodnota sedel V_i , $i = N_v$ kde:

$$V_i = R - R_i \text{ pro } R_i - R < 0 \quad \text{a} \quad V_i = 0 \text{ jinak.}$$

Parametry MP a MV dávají informaci o složitosti struktury. Zvláštní píky nebo sedla nebereme v úvahu, ale mají význam v tribologii.

❖ Průměrný čtverec směrnice profilu (PS): je definován vztahem:

$$PS = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_j \left(\frac{dR(x)}{dx} \right)_j^2} . \quad (13)$$

❖ Průměrná křivost profilu PC: tato veličina je často označována jako vlnitost, je definována obdobnou cestou:

$$PC = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_j \left(\frac{d^2 R(x)}{dx^2} \right)_j^2}. \quad (14)$$

Směrnice a křivost jsou charakteristické pro profil povrchu a mají význam pro tribologické aplikace a pro odrazové vlastnosti. Pro případ fraktálních povrchů mohou být počítány z mechanické spektrální hustoty, autokorelační funkcí nebo variogramem.

❖ Průměrná směrnice profilu MS: tato charakteristika je definována jako:

$$MS = \frac{1}{M} \sum_j \left| \frac{dR(x)}{dx} \right|_j. \quad (15)$$

MS je důležitým parametrem v mnoha aplikacích, jako je odhad smykového tření a ve sledování reflexe světla z povrchů resp. opotřebení.

❖ Průměr deseti bodů TP: tato charakteristika je definována jako průměrná odchylka mezi pěti nejvyššími píky a pěti nejhlubšími sedly v rozmezí povrchového profilu. Parametr TP je citlivý na přítomnost vysokých píků nebo hlubokých trhlin v povrchu materiálu a hodí se pro účely řízení jakosti.

Tyto parametry jsou vhodné pro charakterizaci chování povrchů a eliminaci poruch a jiných důležitých vlastností. Lze je rozdělit do následujících skupin:

- statistické charakteristiky distribuce SHV (rozptyl, šikmost, špičatost)
- prostorové charakteristiky jako jsou autokorelace a variogram

Existuje rozsáhlé množství empirických profilů nebo charakteristik drsnosti povrchu vhodných často ve velmi speciálních situacích. Některé z nich jsou těsně spojeny s charakteristikami vypočtenými z fraktálních modelů. Greenwood navrhnul obecnou teorii pro popis drsnosti povrchu založenou na rozložení výšek. Nejběžnější cesta k oddělení drsnosti a vlnitosti je spektrální analýzou. Tato analýza je založena na Fourierově transformaci z prostorové oblasti d do kmitočtové oblasti $\omega = 2\pi/d$ [7].

Fraktální rozměr D může být odhadnut následující cestou: Číslo $N(\delta)$ je měřeno v rovině dráhy úseku délky δ potřebné k zakrytí celé křivky. Délka křivky je odhadnuta jako $L(\delta) = N(\delta) \delta$. V mezi $\delta \rightarrow 0$ se odhad stává asymptotický rovnající se délce

křivky L , nezávisle na δ . Kompletní odhad fraktálního rozsahu je uveden v literatuře [8]. Fraktální rozsah byl vyjádřen tímto vztahem

$$D = 1 - \left(\frac{\log L(\delta)}{\log \delta} \right), \quad (16)$$

kde $L(\delta)$ je faktor změny délky.

Pro výpočet výše uvedených charakteristik byl vytvořen program DRSNOST v integrovaném systému MATLAB. Jsou v něm počítány následující charakteristiky:

- a) průměrná absolutní odchylka MAD ;
- b) průměrná směrnice profilu (počítáno pro $ds = 1$) MS ;
- c) průměrný čtverec profilu (počítáno pro $ds = 1$) PS ;
- d) průměrná křivost profilu (počítáno pro $ds = 1$) PC ;
- e) Průměr 10ti bodů TP ;
- f) variační koeficient výšky profilu CV ,
- g) průměrný fraktální rozměr D_F ;
- h) počáteční fraktální rozměr D_{Fp} (hodnota pro prvních 12 bodů, kromě prvních tří, jelikož se nacházejí blízko počátku).

3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

3.1 Popis hodnocených materiálů

Pro měření vybraných mechanických vlastností bylo použito sedmnáct 100% polyamidových materiálů (síťovin) poskytnutých KTM (katedrou textilních materiálů). Každá síťovina je označena příslušným číslem a písmenem označující jejich různou jemnost. Tyto síťoviny jsou provázány v plátňové vazbě a jsou charakterizovány tloušťkou (*tab.3.1*), která byla hodnocená podle normy ČSN EN ISO 5084, při těchto vstupních parametrech:

- plocha snímací hlavy 1000 mm²
- tlak $p=0,5$ kPa

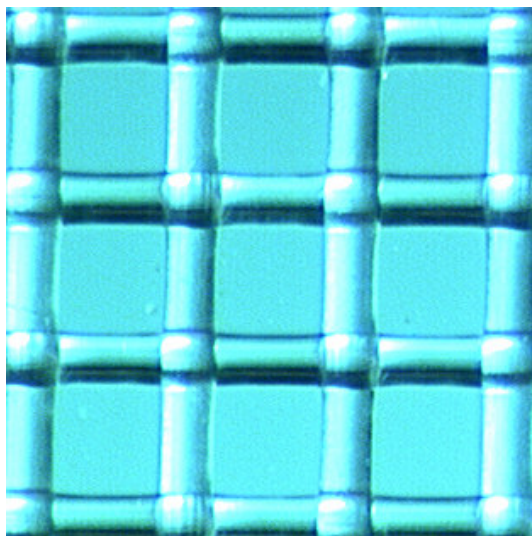
V *tabulce 3.1* jsou taktéž uvedeny další základní charakteristiky síťovin (počet nití v osnově a útku měřených na 10 cm, průměr a jemnost osnovy a útku).

Tabulka 3.1: Základní charakteristiky síťovin

| Typ síťoviny | Tloušťka t [mm] | Dostava D [cm ⁻¹] | Průměr d [μm] | Jemnost monofilu [tex] |
|--------------|-----------------|-------------------------------|---------------|------------------------|
| 130T | 0,024 | 1320 | 36,971 | 1,226 |
| 120T | 0,028 | 1190 | 37,362 | 1,250 |
| 100T | 0,048 | 1030 | 44,279 | 1,761 |
| 90T | 0,050 | 925 | 46,518 | 1,939 |
| 74T | 0,050 | 745 | 52,744 | 2,492 |
| 67M | 0,040 | 660 | 50,615 | 2,301 |
| 63M | 0,050 | 635 | 53,521 | 2,566 |
| 59S | 0,070 | 595 | 52,709 | 2,489 |
| 53S | 0,040 | 535 | 52,038 | 2,428 |
| 45S | 0,108 | 440 | 62,293 | 3,476 |
| 39M | 0,102 | 405 | 82,721 | 6,131 |
| 35S | 0,112 | 350 | 85,094 | 6,488 |
| 32S | 0,136 | 325 | 83,730 | 6,282 |
| 28S | 0,158 | 270 | 103,704 | 9,636 |
| 26S | 0,164 | 255 | 104,525 | 9,785 |
| 25S | 0,160 | 255 | 103,048 | 9,510 |
| 19M | 0,288 | 200 | 167,370 | 25,090 |

3.1.1 MĚŘENÍ PRŮMĚRU MONOFILU

Pro zjištění průměrů osnovy a útku síťovin byla použita metoda obrazové analýzy. U každé síťoviny byl průměr změřen 10x po osnově a stejně tak po útku. Z analyzovaných průměrů osnovy a útku je zřejmé, že mezi nimi byly jen nepatrné rozdíly (zhruba na 5ti %). Proto se při výpočtech jemnosti bude pracovat s jejich průměrnými hodnotami, které jsou uvedeny v *tabulce 3.1*. Na *obr. 3.1* je právě pomocí obrazové analýzy zobrazena síťovina s označením 19M (nejhrubší).



Obr. 3.1: Síťovina s označením 19M

Měření bylo prováděno pomocí softwarového systému Lucia G firmy Laboratory Imaging s.r.o., umístěného na Katedře textilních materiálů. Hlavní součástí je digitální kamera, která je napojená na optické zařízení, umožní sejmut obraz a převést do počítače.

Obrazová analýza umožňuje studovat objekty v široké škále zvětšení, a proto je s úspěchem používána pro studium textilních struktur.

Aby bylo možné obraz zpracovat v počítačové podobě, je nutné ho digitalizovat. Obraz je charakterizován spojitou obrazovou funkcí. Digitalizací se tato funkce převede na diskrétní obrazovou funkci, která nabývá celočíselných hodnot. Základní jednotkou digitalizovaného obrazu dále nedělitelnou je obrazový element, tzv. pixel [10].

3.1.2 VÝPOČET JEMNOSTI SÍŤOVIN

Z naměřených průměrů monofilů d byly vypočítány zvlášť pro osnovu a útek jejich aritmetické průměry [μm]

$$\bar{d} = \frac{1}{n} \sum_i d_i, \quad (17)$$

směrodatné odchylky [μm]

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (d_i - \bar{d})^2}, \quad (18)$$

a variační koeficienty [%]

$$v_d = \frac{s}{\bar{d}} \cdot 100, \quad (19)$$

kde n je počet měření průměru osnovy a útku.

Síťoviny jsou vyrobené z kruhových vláken (monofilů). Předpokládá se, že u monofilů nedojde k žádné deformaci – mají stále kruhový průřez. Proto pro výpočet délkové hmotnosti (jemnosti) monofilu T_m [tex] můžeme použít odvozeného vztahu z Taylorova rozvoje, který je definován takto:

$$T_m = \frac{\pi}{4} \cdot 10^6 \cdot \rho \cdot \bar{d}^2 \cdot \left[1 + \left(\frac{v_d}{100} \right)^2 \right]. \quad (20)$$

Kde ρ je měrná hmotnost monofilu a pro 100% polyamid má hodnotu 1140 kg.m^{-3} .

3.2 Objektivní metody hodnocení povrchu plošných textilií

V této kapitole jsou blíže popsány principy a zpracování výsledků pro dvě objektivní metody, přesněji přístroje, pro hodnocení povrchu plošných textilií. Prvním z uvedených je tloušťkoměr a jako druhý je popisován Kawabatův hodnotící systém.

3.2.1 MĚŘENÍ DRSNOSTI TEXTILIÍ NA PŘÍSTROJI TLOUŠŤKOMĚR

Popis přístroje tloušťkoměr SDL M 034/1

Jedna z metod měření povrchové drsnosti textilií je pomocí tloušťkoměru (*obr.3.2*). Princip snímání povrchové drsnosti je založený na registraci tloušťky v předem stanovených intervalech.

Tloušťkoměr je vybaven odtahovým válečkem, který protahuje materiál pod určitou silou a snímačem, jež měří tloušťku materiálu. Rychlost odtahování je závislá na typu měřeného materiálu.

K zařízení je připojený software pro zaznamenání tloušťky. Umožňuje nastavit definice, které budou měřit proměnlivou tloušťku vzorku po celé nastavené délce materiálu. V průběhu zkoušky se údaje o tloušťce a délce zaznamenávají do paměti [9].

Vstupní hodnoty nastavené na přístroji:

- odtahová rychlost: 10 mm/min.
- měřená délka: 35 mm
- interval 10 mm

Postup měření

Ze síťovin bylo připraveno 17 vzorků o rozměrech 800x100 mm. Vzorky se vkládaly rovnoběžně s měřicí deskou pod snímač a odtahový váleček, který se pohyboval konstantní rychlostí 10 mm/min. U každého vzorku byla jeho tloušťka zjišťována pomocí dvou snímačů, které jsou z ocelového drátu a mají shodnou konstrukci jako Kawabatův kontaktor. Průměr slabého snímače je 0,5 mm a silného snímače 1 mm. Vzorky byly postupně proměřeny ve směru osnovy na různých pěti místech. Naměřená data se ukládala do softwaru, který je propojen s tloušťkoměrem.



Obr. 3.2: Tloušťkoměr SDL M 034/1

3.2.2 ZPRACOVÁNÍ NAMĚŘENÝCH DAT

Před vlastním vyhodnocením povrchových charakteristik bylo zapotřebí naměřené hodnoty tloušťky (vstupní hodnoty pro software) pro zadané intervaly ve stanovených úsecích v mm, které se ukládaly s příponou dat převést na hodnoty tloušťky s příponou txt.

Vyhodnocování zjištěných drsností z tloušťkoměru bylo provedeno v připraveném skriptu pomocí softwaru MATLAB, kde podle definovaných vztahů uvedených níže a v kapitole 2.4.1.1 bylo vygenerováno třináct statistických charakteristik popisujících povrchovou drsnost a pro každou byla spočítána střední hodnota (viz. příloha č.1 - 2).

Doplnění zbývajících vzorců pro výpočet statistických parametrů, které jsou součástí skriptu DRSNOST:

Aritmetický průměr [mm] (viz. rovnice 16)

$$\text{Geometrický průměr [mm]} \quad R_{a,geom} = \sqrt[n]{R_1 \cdot R_2 \cdot \dots \cdot R_n} \quad (21)$$

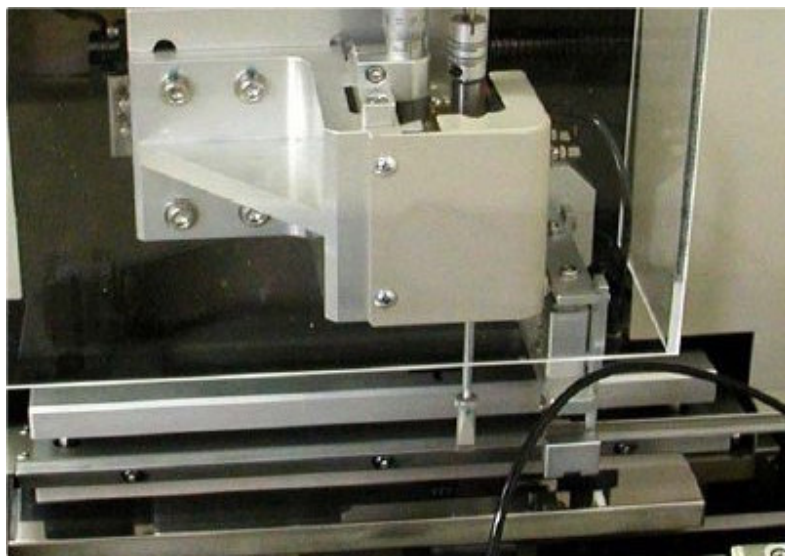
$$\text{Rozptyl [mm}^2\text{]} \quad SD^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (R_j - \bar{R}_a)^2 \quad (22)$$

3.3 KES – Kawabata Evaluation System

V této kapitole je blíže popsán přístroj na měření povrchové drsnosti a povrchového tření KES–FB4, který je vyobrazen na obr. 3.3. Vzorek se pohybuje zleva doprava a zpět otáčením bubnu, na kterém je připevněný jeden konec vzorku. Druhý konec vzorku je uchycen výkyvnou pákou, která dává vzorku napětí. Detektor drsnosti se pohybuje z horní části směrem dolů a vzorku se dotýká ve standardizovaných podmínkách. Výchylka tohoto detektoru způsobená drsností vzorku je přeměněna na elektrický signál lineárním transformátorem umístěným na horním konci detektoru. Signál z měniče je předán filtru mající předepsaný frekvenční průběh a je integrovaný k výpočtu SMD.

Výstupními hodnotami z přístroje KES-FB4 byl záznam kolísání tloušťky $T(x_j)$ a záznam kolísání koeficientu tření $\mu(x_j)$, kde $j = 1 \dots X$. Tyto hodnoty tvoří vstupní data pro software, který je připojený k zařízení (zaznamenává v grafech průběhy

měření) a ten je zpracovává do výstupních hodnot, tj. *MIU*, *MMD* a *SMD* (viz. rovnice č.4-6).



Obr. 3.1: Přístroj KES-FB4 pro hodnocení povrchových charakteristik

3.3.1 ZPRACOVÁNÍ NAMĚŘENÝCH HODNOT

Na všech čtyřech přístrojích bylo proměřeno 17 vzorků, které jsou součástí Kawabatova hodnotícího systému a simulují mechanické namáhání. Připravené vzorky měly rozměry 200x35 mm a každý byl měřen 3x jak po osnově, tak po útku.

Tabulka 3.2: Systém KES-FB a jejich výstupní charakteristiky

| Přístroj | Použití | Měřené charakteristické hodnoty |
|----------|------------------------|---------------------------------|
| KES-FB1 | testování tahu a smyku | LT, WT, RT, G, 2HG, 2HG5 |
| KES-FB2 | testování ohybu | B, 2HB |
| KES-FB3 | testování objemu | LC, WC, RC, T |
| KES-FB4 | testování povrchu | MIU, MMD, SMD |

Ke každému přístroji je připojen software, který zaznamenává a následně vyhodnotí charakteristické veličiny pro každý přístroj (tabulka 3.2). Pro každou síťovinu byly z výše uvedených charakteristických parametrů vypočítány aritmetické průměry a směrodatné odchylky (viz. příloha č. 3).

3.4 Výpočet Spearmanova koeficientu

Pro porovnání vzájemného vztahu čili korelace mezi dvěmi náhodnými veličinami byla použita pořadová korelace, která je málo citlivá na vybočující hodnoty. Pořadí i -tého prvku výběru je rovno indexu odpovídající pořádkové statistiky. Označme pořadí prvků výběru vzhledem k proměnné ξ_1 jako x_{1s} a pořadí prvků výběru vzhledem k proměnné ξ_2 jako x_{2s} . Pro Spearmanův pořadový korelační koeficient [-] pak platí

$$r = 1 - \frac{6}{n_s(n_s^2 - 1)} \sum_{i=1}^n (x_{1s} - x_{2s})^2, \quad (23)$$

kde n_s je počet párových dvojic x_{1s} a x_{2s} . Korelační koeficienty slouží jako základní míry pro vyjádření těsnosti lineární vazby a obecně nabývají hodnot od -1 do +1. Jsou to neparametrické odhady párových korelací založené na pořadí místo na hodnotách dat. Pokud závislá veličina y roste s rostoucím x , je korelační koeficient kladný ($r > 0$). Když veličina y s rostoucím x klesá, je korelační koeficient záporný ($r < 0$) – mezi veličinami je uvažována lineární závislost se zápornou směrnici.

3.5 Analýza rozptylu – ANOVA

ANOVA (Analysis of Variance) - analýza rozptylu slouží k porovnání různých zdrojů (faktorů) nebo vlastností různých tříd materiálu na základě změřených hodnot nebo charakteristik. Cílem je rozhodnout, zda se střední hodnota měřené veličiny pro různé faktory liší, či nikoliv. Předpokladem pro výpočet je normalita dat pro jednotlivé úrovně faktorů a nepřítomnost vybočujících měření.

Zdrojem variability výsledků měření y_{ij} jsou jednotlivé úrovně faktoru, kterým odpovídá jednoduchý model, $j = 1, \dots, n_i$

$$y_{ij} = \mu_i + \varepsilon_{ij}, \quad (24)$$

kde μ_i je skutečná hodnota výsledků analýz a ε_{ij} označuje náhodnou chybu. Veličina μ_i se rozkládá na složku odpovídající celkovému průměru μ_c ze všech úrovní faktoru a efektu i -té úrovně daného faktoru α_i

$$\mu_i = \mu_c + \alpha_i. \quad (25)$$

Účelem analýzy rozptylu je testování shody jednotlivých úrovní, čili nulové hypotézy $H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3$, nebo významnosti efektů α_i , čili nulové hypotézy $H_A: \alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = 0$.

Podle konkrétního uspořádání experimentu existuje množství variant analýzy rozptylu. Pokud nás zajímají pouze rozdíly mezi danými úrovněmi, jedná se o modely s pevnými efekty. O modelech s náhodnými efekty mluvíme tehdy, když jsou jednotlivé úrovně pouze výběrem z konečného či nekonečného souboru. Sledujeme-li pouze jeden faktor, jde o jednofaktorovou analýzu rozptylu, čili třídění dle jednoho faktoru. Často se však sleduje i vliv několika faktorů, kdy jde o vícefaktorovou analýzu rozptylu [11].

3.5.1 DVOUFAKTOROVÁ ANALÝZA ROZPTYLU

Anova pro 2 faktory je rozšířením jednofaktorové analýzy rozptylu. Analyzuje se vliv různých úrovní dvou faktorů A a B s pevnými efekty na výsledek pozorování. Obecný model analýzy rozptylu pro případ více opakování lze formálně zapsat jako

$$\mu_{ij} = \mu_0 + \alpha_i A_i + \beta_j B_j + \lambda_{ij} + \varepsilon_{ij}, \quad (26)$$

kde μ_{ij} je skutečná “teoretická” hodnota výsledku analýzy pro kombinaci faktorů $A_i B_j$, μ_0 je absolutní člen, složky α_i a β_j odpovídající efektům faktorů A a B, člen λ_{ij} označuje efekt interakce úrovní A_i a B_j , ε_{ij} je náhodná chyba s normálním rozdělením a definičně nulovou střední hodnotou, $\varepsilon_{ij} \approx N(0, \sigma^2)$. Definičně je dáno $\sum \alpha_i = 0$, resp. $\sum \beta_j = 0$.

Jedna kombinace úrovně prvního a druhého faktoru (např. $A_i B_j$) tvoří typickou mřížkovou strukturu, která se nazývá cela (buňka).

Každá cela musí obsahovat alespoň jedno pozorování. Je-li ve všech celách stejný počet pozorování, jedná se o vyvážené experimenty (plány), resp. vyváženou analýzu rozptylu. V opačném případě se jedná o analýzu rozptylu nevyváženou. Podle počtu měření při jednotlivých kombinacích, tedy počtu měření v cele lze rozlišit 3 typy analýzy rozptylu [13]:

- pokud je v každé cele jen 1 opakování = ANOVA bez opakování (2P).
- pokud je v každé cele více než jedno opakování, ale ve všech celách stejný počet = vyvážená dvoufaktorová ANOVA (2B).
- pokud je v každé cele více než jedno opakování, a počet se v celách liší = nevyvážená dvoufaktorová ANOVA (2B).

3.6 Regresní analýza

V řadě technických oborů se sleduje závislost výstupní veličiny y na nastavované kombinaci hodnot vstupních veličin x . Cílem statistické analýzy je objasnění vnitřních vztahů mezi měřenou, výstupní závisle proměnnou (vysvětlovanou) veličinou y a nastavovanými, vstupními nezávisle proměnnými (vysvětlujícími) veličinami x .

Při posuzování se sleduje především výskyt vlivných bodů, které mohou být hlavním zdrojem problémů a vedou až k jejich naprosté nepoužitelnosti.

Obecný model lineární regrese - **bez transformace** slouží pro tvorbu a analýzu lineárních regresních modelů v obecném tvaru

$$y = b_0 + b_1 F_1(x) + b_2 F_2(x) + \dots + b_m F_m(x) + \varepsilon_{ij}, \quad (27)$$

kde y je libovolná funkce závisle proměnná, b_0 je absolutní člen, $F_i(x)$ jsou libovolné funkce nezávisle proměnné x_1, x_2, \dots, x_k (nikoli parametrů), b_1, b_2, \dots, b_m jsou neznámé parametry, ε_{ij} je náhodná chyba. Výraz $F_i(x)$ se také nazývá člen lineárního modelu.

Předpokládá se, že x je pokud možno deterministická (nenáhodná) nezávisle nastavená nebo jinak zjištěná veličina. Veličina y na x závisí, ale její hodnota je zatížena náhodnou chybou ε . Parametry b se odhadují na základě dat a daného modelu zvolenou robustní nebo nerobustní metodou. Tato trojice okolností (data, model, metoda) se někdy označuje jako regresní triplet a každé je třeba věnovat stejnou pozornost, chceme-li dosáhnout korektních výsledků. K tomu slouží bohatá regresní diagnostika a bohatý výběr metod a dalších nástrojů [12].

Lineární regresní model je definován takto

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_1 x_2 + \varepsilon_{ij}, \quad (28)$$

kde počet parametrů m je daný počtem nezávisle proměnných.

Kvadratický model, též nazývaný Taylorův rozvoj 2. stupně je uveden ve tvaru

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_1 x_2 + b_4 x_1^2 + b_5 x_2^2 + \varepsilon_{ij}. \quad (29)$$

4 VÝSLEDKY A JEJICH DISKUZE

Cílem této práce bylo stanovit povrchovou drsnost monofilních textilií (síťovin) pomocí měřicího zařízení tloušťkoměru a vyhodnocené povrchové charakteristiky porovnat s výsledky povrchových parametrů podle Kawabatova hodnotícího systému.

Obě výše uvedené objektivní metody využívají pro hodnocení povrchu textilií contactoru - snímače, který se po vzorku pohybuje předem definovanou rychlostí. Avšak každá metoda je založena na jiném principu vyhodnocení výstupních dat a proto se i jejich jednotlivé charakteristiky liší.

4.1 Statistické zpracování dat

Při statistickém šetření vztahu mezi zjištěnými veličinami byla nejprve řešena otázka korelace (závislosti), u které byla sledována míra intenzity (těsnosti), tzn. koeficient korelace. Pro nesplnění předpokladů normálního rozdělení (v měření se vyskytla odlehlá data) bylo s výhodou použito Spearmanova korelačního koeficientu.

Zkoumání závislosti statistických charakteristik na druhu síťoviny a typu snímače bylo provedeno analýzou rozptylu.

Parametry, které byly podrobeny statistickému zpracování:

Z Kawabatova přístroje byly analyzovány tyto povrchové charakteristiky:

- střední hodnota koeficientu tření MIU ,
- směrodatná odchylka koeficientu tření MMD ,
- směrodatná odchylka geometrické drsnosti SMD .

Z tloušťkoměru byly pro další analýzu vybrány tyto povrchové charakteristiky:

- průměrná absolutní chyba MAD ,
- průměrná směrnice profilu MS ,
- průměrný čtverec směrnice profilu PS ,
- průměrná křivost profilu PC ,
- desetibodový průměr TP ,
- variační koeficient výšky profilu CV ,
- průměrný fraktální rozměr D_F ,

- počáteční hodnota fraktálního rozměru D_{Fp} .

Pro výstavbu lineárních regresních modelů pro obě metody byly za nezávisle proměnné zvoleny jemnost T [tex] a dostava D [cm⁻¹] síťovin, jejich hodnoty jsou uvedeny v *tabulce 3.1*.

Pro všechny testy a intervaly spolehlivosti je standardně uvažována hladina významnosti $\alpha = 0,05$.

4.1.1 ANALÝZA ROZPTYLU

Ke zpracování bylo využito jednofaktorové analýzy rozptylu. Z výsledků této analýzy můžeme konstatovat, že silný i slabý snímač významně ovlivňuje všech osm povrchových charakteristik.

Dále byl testován vzájemný vliv druhu síťovin a typu snímačů na charakteristiky z tloušťkoměru dvoufaktorovou analýzou rozptylu.

Cílem je stejně jako u 1-faktorové analýzy, ale mezi dvěma faktory definovat, který z nich významně ovlivňuje sledované veličiny. Nejde přitom o to jak, ale zda je vůbec ovlivňuje. V našem případě se jedná o dvoufaktorovou analýzu bez opakování (ANOVA2P). Sledujeme jaký vliv má faktor A - druh síťoviny a faktor B - typ snímače (silný nebo slabý) na výsledek osmi povrchových charakteristik z tloušťkoměru. Programem byly provedeny testy významnosti faktorů A, B a AB postupně pro všech osm povrchových charakteristik z tloušťkoměru.

Vliv silného a slabého snímače a typů síťovin na povrchové charakteristiky je uveden v *tabulce 4.1*, která je sestavena na základě F-testu významnosti faktorů, resp. interakcí, včetně kombinovaných testů pro ověření celkové významnosti faktorů A, B . Je-li F-kritérium větší, než kritický kvantil, je příslušný parametr významným zdrojem variability.

Tabulka 4.1: Vliv snímačů a síťovin na povrchové charakteristiky tloušťkoměru

| | MAD | MS | PS | PC | TP | CV | D _F | D _{Fp} |
|--------------|-----|----|----|----|----|----|----------------|-----------------|
| Faktor A | V | V | V | V | V | N | N | N |
| Faktor B | N | N | N | N | V | N | N | N |
| Interakce AB | N | N | N | N | N | N | N | N |

V – vliv faktoru je významný, N – vliv faktoru je nevýznamný

Z tabulky 4.1 lze vyčíst, že faktory A a B ovlivňují pouze povrchovou charakteristiku TP, faktor A má vliv na povrchové parametry MS, PS a PC a pro ostatní charakteristiky je vliv faktoru nevýznamný.

4.1.2 VÝPOČET SPEARMANOVA KOEFICIENTU

Z tabulky 4.2 je vidět, že lineární závislost (Spearmanův korelační koeficient) mezi proměnnými \underline{x} (statistické parametry pro slabý snímač) a \underline{y} (statistické parametry pro slabý snímač) ukazují charakteristiky R_a , $R_{a,geom}$, MAD, MS, PS, PC a TP.

Tabulka 4.2: Spearmanovy korelační koeficienty mezi charakteristikami SILNÉHO a SLABÉHO snímače

| $x \backslash y$ | R_a | $R_{a,geom}$ | MAD | MS | PS | PC | TP | CV | D_{Fp} | D_F |
|------------------|--------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|--------------|--------|---------------|--------|
| R_a | 0,855 | 0,877 | 0,868 | 0,784 | 0,782 | 0,787 | 0,858 | 0,449 | -0,547 | 0,039 |
| $R_{a,geom}$ | 0,855 | 0,877 | 0,868 | 0,784 | 0,782 | 0,787 | 0,858 | 0,449 | -0,547 | 0,039 |
| MAD | 0,912 | 0,819 | 0,809 | 0,694 | 0,699 | 0,699 | 0,689 | 0,449 | -0,699 | -0,135 |
| MS | 0,973 | 0,882 | 0,799 | 0,711 | 0,708 | 0,718 | 0,782 | 0,382 | -0,640 | 0,002 |
| PS | 0,973 | 0,882 | 0,799 | 0,711 | 0,708 | 0,718 | 0,782 | 0,382 | -0,640 | 0,002 |
| PC | 0,968 | 0,877 | 0,797 | 0,696 | 0,691 | 0,703 | 0,777 | 0,392 | -0,637 | 0,017 |
| TP | 0,966 | 0,875 | 0,836 | 0,755 | 0,752 | 0,760 | 0,735 | 0,419 | -0,725 | -0,105 |
| CV | 0,706 | 0,581 | 0,515 | 0,480 | 0,483 | 0,473 | 0,358 | 0,238 | -0,571 | -0,074 |
| D_{Fp} | -0,353 | -0,539 | -0,593 | -0,623 | -0,630 | -0,618 | -0,490 | -0,338 | 0,458 | 0,262 |
| D_F | 0,245 | 0,071 | -0,103 | -0,054 | -0,051 | -0,056 | -0,029 | -0,154 | 0,047 | 0,282 |

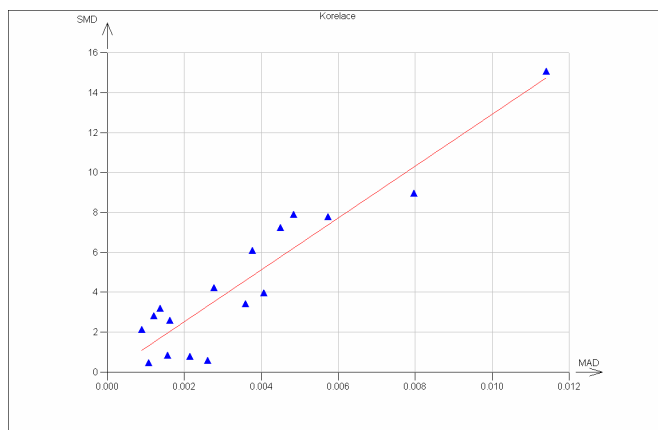
V tabulce 4.3 jsou uvedeny Spearmanovy korelační koeficienty pořadí mezi směrodatnou odchylkou geometrické drsnosti a statistickými charakteristikami slabého a silného snímače.

Je-li jeho absolutní hodnota 1, jde o funkční závislost, body leží na přímce. Pokud je parametr r roven 0, jedná se o naprostou nezávislost mezi veličinami. Pokud závislá veličina y roste s rostoucím x , je korelační koeficient kladný ($r > 0$). Když veličina y s rostoucím x klesá, je korelační koeficient záporný ($r < 0$).

Tabulka 4.3: Spearmanovy korelační koeficienty mezi SMD a charakteristikami z tloušťkoměru

| Povrchové charakteristiky | SMD pro slabý | SMD pro silný |
|---------------------------|---------------|---------------|
| R_a | 0,885 | 0,887 |
| $R_{a, \text{geom}}$ | 0,885 | 0,860 |
| MAD_ | 0,819 | 0,860 |
| MS_ | 0,904 | 0,777 |
| PS_ | 0,904 | 0,770 |
| PC_ | 0,909 | 0,779 |
| TP_ | 0,897 | 0,853 |
| CV_ | 0,630 | 0,510 |
| f_{in} | -0,348 | -0,552 |
| full | 0,221 | 0,132 |

Pro odhalení případných nelineárních závislostí, která se projevuje v korelačních koeficientech bylo využito grafického zobrazení. V grafu 4.1 je zobrazena lineární závislost směrodatné odchylky geometrické drsnosti SMD na průměrné absolutní chybě MAD silného snímače, dvou charakteristik, které spolu korespondují. Ostatní grafy představující vzájemné párové vztahy mezi proměnnými, které vykazují dobrou lineární závislost jsou uvedeny v příloze č. 4.



Graf 4.1: Závislost SMD na MAD

4.1.3 REGRESNÍ ANALÝZA

Pomocí regresní analýzy byl zjišťován vliv jemnosti a dostavy na jednotlivé povrchové parametry.

Mezi sledovanými veličinami, u kterých byla prokázána závislost jsme se ji snažili vyjádřit matematickým vztahem, která by co nejlépe vyjadřovala její charakter, tzn. řešili jsme problém regrese. Při stavbě regresních modelů bylo použito metody nejmenších čtverců (MNČ), která musí splňovat základní předpoklady [12]. Platností těchto předpokladů jsou odhady vektorů neznámých parametrů b nejlepší, nestranné, lineární a mají asymptoticky normální rozdělení.

4.1.3.1 Návrh modelů pro povrchové vlastnosti z KESu

Cílem regresní analýzy je vyčíslení nejlepších odhadů neznámých parametrů regresního modelu $b_0 - b_m$, kde je počet neznámých dán výběrem transformace. Bylo vyzkoušeno několik návrhů regresních modelů, které hrají důležitou roli při určování regresních koeficientů (viz. kapitola 3.6).

Začíná se vždy od nejjednoduššího modelu, u kterého vystupují jednotlivé proměnné v prvních mocninách. Pro povrchové charakteristiky byly navrženy tři modely, ten který ji nejlépe popisoval je uveden a zhodnocen v této kapitole. Ostatní návrhy jsou u vedené v přílohách č. 6-10.

Z Kawabatova přístroje byly za závisle proměnné pro výpočet hodnot regresních parametrů použity následující střední hodnoty povrchových charakteristik (viz. tabulka 4.4):

Tabulka 4.4: Povrchové charakteristiky z KESu

| Pořadí hodnot | Druh síťoviny | MIU [-] | MMD [-] | SMD [μm] |
|---------------|---------------|---------|---------|-----------------------|
| 1 | 19M | 0,1022 | 0,0833 | 15,0633 |
| 2 | 25S | 0,0730 | 0,0387 | 8,9587 |
| 3 | 26S | 0,0735 | 0,0323 | 7,7782 |
| 4 | 28S | 0,0753 | 0,0388 | 7,8992 |
| 5 | 32S | 0,0818 | 0,0177 | 3,9610 |
| 6 | 35S | 0,0825 | 0,0335 | 7,2347 |
| 7 | 39M | 0,1012 | 0,0745 | 6,0857 |
| 8 | 45S | 0,0740 | 0,0228 | 3,4172 |
| 9 | 53S | 0,0778 | 0,0263 | 4,2065 |
| 10 | 59S | 0,0850 | 0,0210 | 3,1763 |
| 11 | 63M | 0,0807 | 0,0185 | 2,8117 |
| 12 | 67M | 0,0862 | 0,0305 | 2,5832 |
| 13 | 74T | 0,0813 | 0,0305 | 2,1175 |
| 14 | 90T | 0,0803 | 0,0093 | 0,8268 |
| 15 | 100T | 0,0813 | 0,0213 | 0,7757 |
| 16 | 120T | 0,0825 | 0,0073 | 0,5625 |
| 17 | 130T | 0,0780 | 0,0060 | 0,4548 |

1. Směrodatná odchylka geometrické drsnosti

Podle vyčíslených odhadů mají navržené regresní modely (dle rovnic 27-29) následující tvary:

$$\text{SMD}_{\text{bez transformace}} = 4,13975 + 0,47829 \cdot T - 0,00373 \cdot D$$

$$\text{SMD}_{\text{lineární}} = 4,46391 + 0,53481 \cdot T - 3,5755 \cdot 10^{-3} \cdot D - 3,5239 \cdot 10^{-4} \cdot T \cdot D$$

$$\text{SMD}_{\text{kadratický}} = 4,8870 + 0,5591 \cdot T - 6,4177 \cdot 10^{-3} \cdot D - 1,5123 \cdot 10^{-4} \cdot T \cdot D - 2,9597 \cdot 10^{-3} \cdot T^2 + 1,9392 \cdot 10^{-6} \cdot D^2$$

V tabulce 4.5 jsou pro závisle proměnnou SMD vyčísleny základní statistické charakteristiky tří navržených regresních modelů. Vícenásobné korelační koeficienty R ukazují, že navržené regresní modely jsou statisticky významné (vyjadřují relativní těsnost proložení). Hodnoty koeficientů determinace $D = 100\% \cdot R^2$, představují procento variability, které je zhruba pro všechny modely shodné. Hodnoty koeficientů R_p jsou nižší, jelikož jsou citlivější na vybočující hodnoty než klasický koeficient. Model je optimální tehdy, když hodnoty MEP a AIC nabývají minimálních hodnot, jsou důležitými charakteristikami kvality regrese.

Tabulka 4.5: Statistické charakteristiky regrese pro SMD

| Povrchové charakteristiky | SMD – bez transformace | SMD - lineární | SMD - kvadratická |
|--|------------------------|----------------|-------------------|
| Vícenásobný korelační koeficient R : | 0,97802 | 0,97814 | 0,98002 |
| Koeficient determinace R^2 : | 0,95653 | 0,95676 | 0,96044 |
| Predikovaný korelační koeficient R_p : | 0,84142 | 0,82436 | 0,959212 |
| Střední kvadratická chyba predikce MEP : | 1,15972 | 1,29078 | 162,27809 |
| Akaikeho informační kritérium : | -2,41605 | -0,50463 | 1,98008 |

Mezi základní techniky regresní diagnostiky patří stanovení rozmezí dat, jejich variability a přítomnosti vybočujících pozorování. K tomu bylo využito hned několik grafických diagnostik.

Zhodnocení modelů

Grafy Y-predikce (viz. graf 4.2 a příloha č.6) ukazují, že navržené modely pro SMD jsou lineárně závislé. Bod č.1 můžeme označit za bod vlivný, udává směrnici dat (jejich závislost). Grafy vlivných bodů (L-R graf, projekční matice a Williamsův graf) ukazují na další odlehlé body č. 5 a č.17 (největší odlehlost je u kvadratického modelu), která není tak velká, proto se nemusí dále analyzovat.

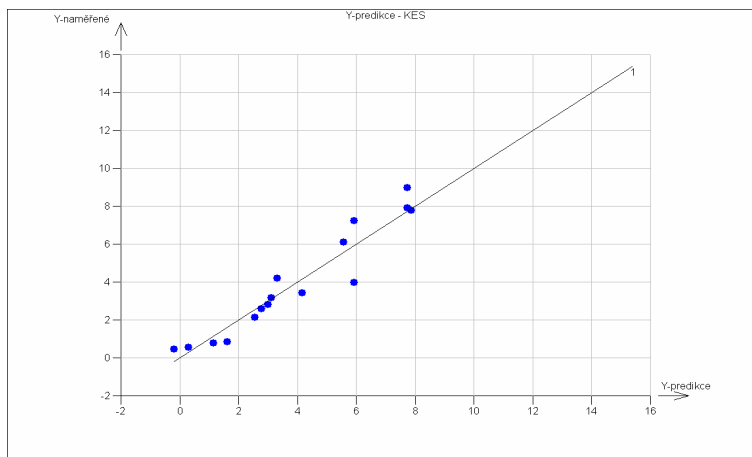
Z parciálních regresních grafů 4.4 a 4.5, je vidět, že navržený model bez transformace má oba koeficienty významné.

Lineární model se jeví jako správný pro b_0 , b_1x_1 , b_2x_2 , pouze b_3x_3 je nadbytečné (viz. příloha č.6). Model Taylorova polynomu 2.stupně ukazuje na nelineární závislosti členů b_4x_4 a b_5x_5 . Nelineární tvar bodů v parciálních grafech indikuje přítomnost nelineární závislosti. Zhodnocením výše uvedeného popisu modelu se jeví jako nepřijatelný. Grafy pro lineární a kvadratické modely SMD jsou uvedeny v příloze č.6.

Porovnáním výsledných statistických charakteristik tří navržených modelů v tabulce 4.5 a podle zhodnocení grafických výstupů je zřejmé, že model, který nejlépe vystihuje závislost SMD na jemnosti a dostavě síťovin je model bez transformace (viz. grafy 4.2–4.5). Stejně tak verbální závěry testů uvedené v regresním tripletu mluví o statisticky významném modelu (význam pojmu regresní triplet je uveden v literatuře [12]).

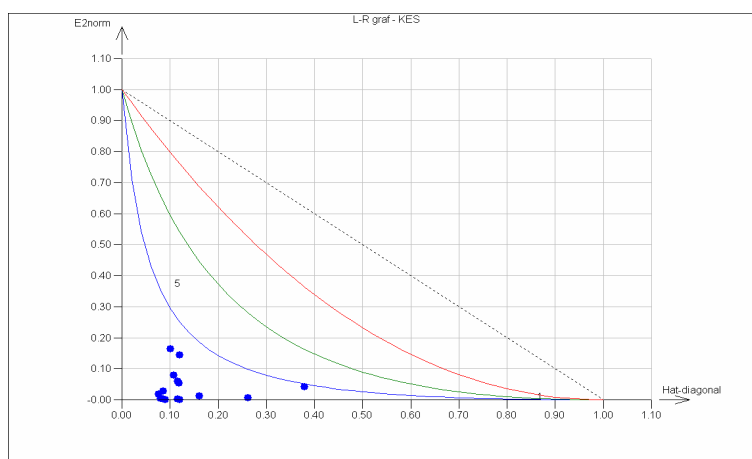
pozn.: číslo místo bodu v grafu znamená pořadí povrchových charakteristik v tabulce 4.4. Čísly jsou zobrazeny ty hodnoty, které jsou blíže přiblíženy (jedná se o hodnoty, které se vychylují od směrnice přímky).

Graf 4.2 vyjadřuje těsnost proložení. Na ose x jsou vypočtené hodnoty závisle proměnné SMD a na ose y jsou naměřené hodnoty jemnosti a dostavy síťovin. Svislá vzdálenost bodu od přímky odpovídá reziduu. Bod č. 1 určuje směrnici přímky a můžeme říci, že je vlivný.



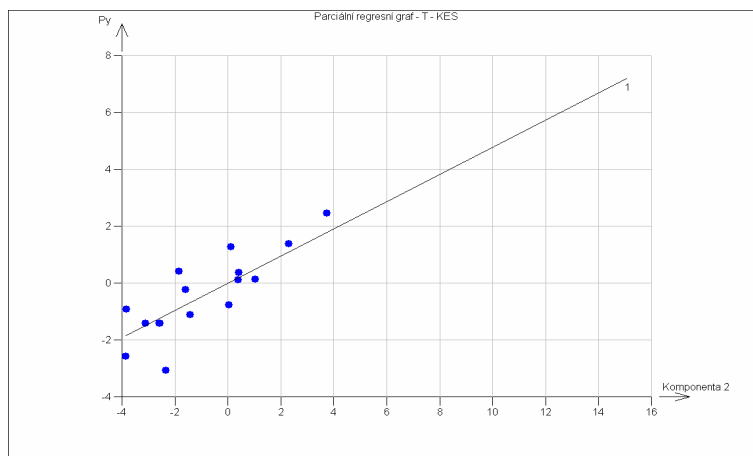
Graf 4.2: Y - predikce pro SMD

Z grafu L-R vlivných bodů jsme schopni indikovat přítomnost odlehklých či vlivných hodnot a extrémů.

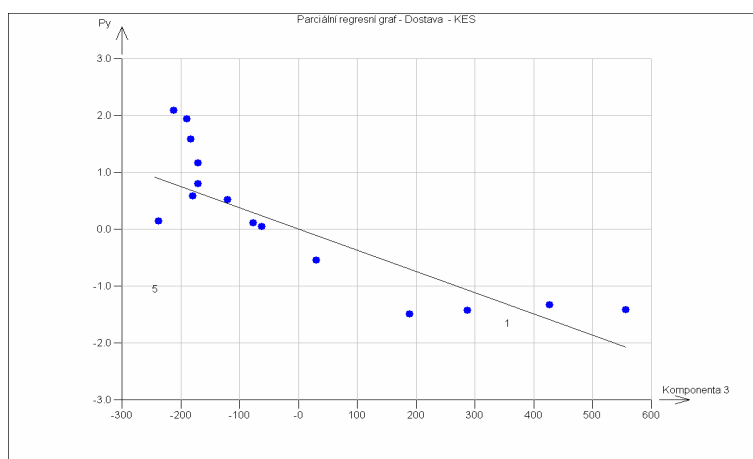


Graf 4.3: L-R graf pro SMD

Pro zhodnocení modelů bylo také použito parciálních reziduálních grafů, které vyjadřují závislost závisle proměnné na zvolené jediné nezávisle proměnné s eliminací vlivu ostatních nezávisle proměnných (viz. grafy 4.4 a 4.5).



Graf 4.4: Parciální regresní graf pro člen b_1x_1 modelu bez transformace



Graf 4.5: Parciální regresní graf pro člen b_2x_2 modelu bez transformace

2 Směrodatná odchylka koeficientu tření. MMD

Podle vyčíslených odhadů mají navržené regresní modely (dle rovnic 27-29) následující tvary:

$$\text{MMD}_{\text{bez transformace}} = 2,5900\text{E-}002 + 2,2518\text{E-}003 \cdot T - 1,3970\text{E-}05 \cdot D$$

$$\text{MMD}_{\text{lineární}} = 1,7913\text{E-}002 - 5,3877\text{E-}003 \cdot T - 3,5165\text{E-}005 \cdot D + 4,7628\text{E-}005 \cdot T \cdot D$$

$$\text{MMD}_{\text{kvadratický}} = 2,9465\text{E-}002 - 1,3385\text{E-}002 \cdot T - 1,3069\text{E-}004 \cdot D + 5,8936\text{E-}005 \cdot T \cdot D + 1,8873\text{E-}004 \cdot T^2 + 4,0012\text{E-}008 \cdot D^2$$

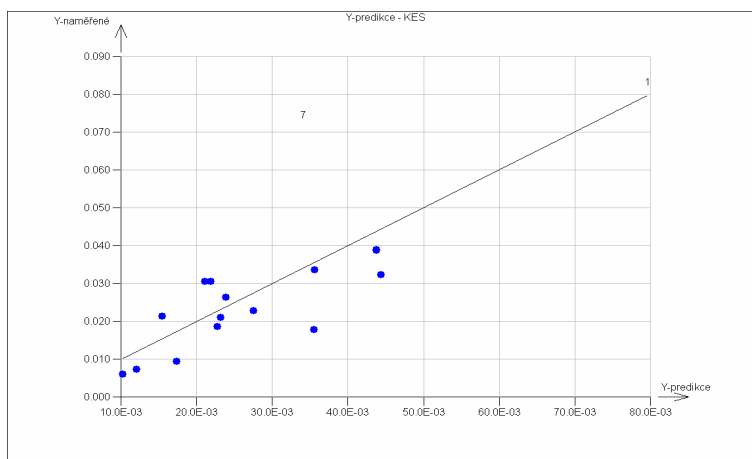
V tabulce 4.6 jsou uvedeny statistické charakteristiky navrhnutých modelů.

Tabulka 4.6: Statistické charakteristiky regrese pro MMD

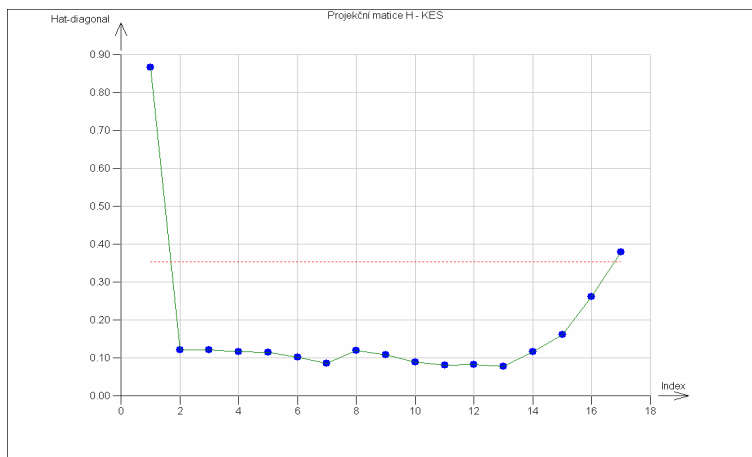
| Povrchové charakteristiky | MMD – bez transformace | MMD - lineární | MMD - kvadratická |
|--|------------------------|----------------|-------------------|
| Vícenásobný korelační koeficient R | 0,80034 | 0,88359 | 0,89942 |
| Koeficient determinace R^2 | 0,64055 | 0,78073 | 0,80895 |
| Predikovaný korelační koeficient R_p | 0,20200 | 0,16627 | 0,824616 |
| Střední kvadratická chyba predikce MEP | 2,2727E-004 | 2,4447E-004 | 3,5983E-002 |
| Akaikeho informační kritérium | -143,87 | -150,27 | -148,61 |

Zhodnocení modelů

Grafy Y-predikce vykazují velmi podobné proložení regresní přímky, i když není v datech taková závislost jako u parametru SMD. Z grafů je patrné, že bod č.1 je bodem vlivným a bod č. 7 je bodem výrazně odlehlým. Z grafů (viz.graf 4.7a příloha č. 7) projekční matice (diagonální prvky projekční matice vyjadřují míru vlivu jednotlivých dat na regresi) lze vyčíst, že modely mají více odlehlých či vlivných bodů (bod č.17). Tedy z grafických diagnostik vyplývá stejně jako pro povrchovou charakteristiku SMD, že neideálnějším modelem pro MMD je model bez transformace. Grafické výstupy pro tento model jsou uvedeny níže zbývající dva jsou uvedeny v přílohách č. 7.



Graf 4.6: Y - predikce pro model bez transformace



Graf 4.7: Projekční matice pro model bez transformace

3. střední hodnota koeficientu tření *MIU*

Regresní modely, pro které byly nalezeny odhady parametrů jsou podle rovnic 27-29 zapsány v tomto tvaru:

$$MIU_{\text{bez transformace}} = 7,2817E-002 + 9,0217E-004 \cdot T + 7,2172E-006 \cdot D$$

$$MIU_{\text{lineární}} = 4,9905E-002 - 3,0929E-003 \cdot T - 3,8669E-006 \cdot D + 2,4907E-005 \cdot T \cdot D$$

$$MIU_{\text{kvadratický}} = 9,9268E-002 - 1,1600E-002 \cdot T - 9,98E-05 \cdot D + 3,65E-05 \cdot T \cdot D + 2,0513E-004 \cdot T^2 + 3,88E-08 \cdot D^2$$

V tabulce 4.7 jsou uvedeny statistické charakteristiky navržených modelů.

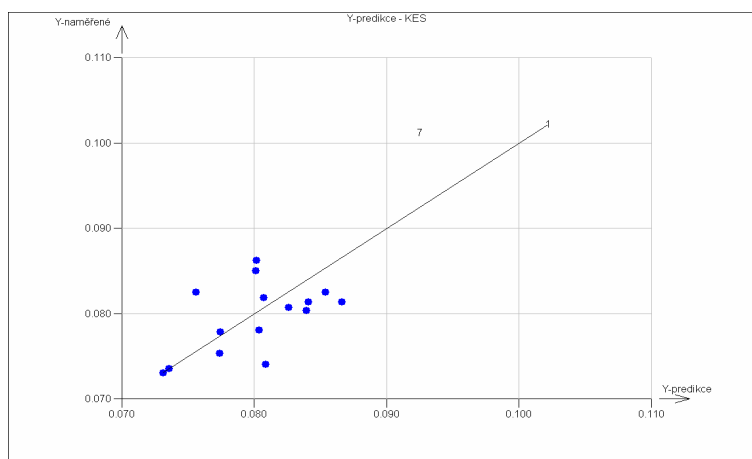
Tabulka 4.7: Statistické charakteristiky regrese pro *MIU*

| Povrchové charakteristiky | MIU – bez transformace | MIU - lineární | MIU - kvadratická |
|--|------------------------|----------------|-------------------|
| Vícenásobný korelační koeficient R | 0,49534 | 0,69919 | 0,85133 |
| Koeficient determinace R^2 | 0,24536 | 0,48887 | 0,72476 |
| Predikovaný korelační koeficient R_p | 1,85084 | 2,29290 | 0,829960 |
| Střední kvadratická chyba predikce MEP | 1,5340E-004 | 1,6339E-004 | 1,3423E-004 |
| Akaikeho informační kritérium | -162,69 | -167,31 | -173,83 |

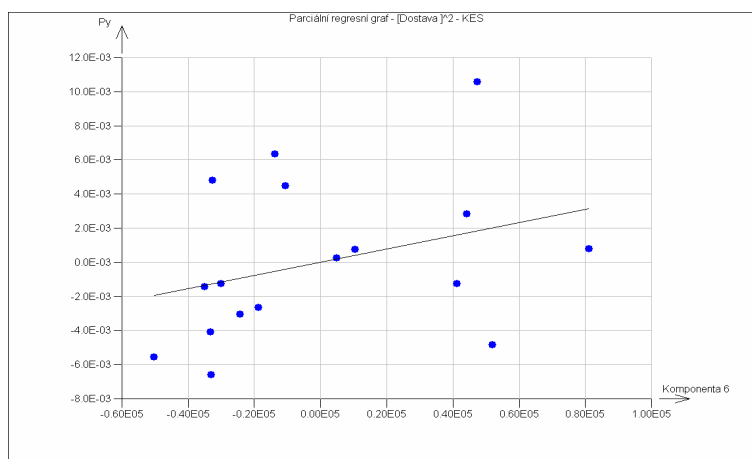
Zhodnocení modelů

Z tabulky 4.7 je patrné, že vícenásobné koeficienty nenabývají takových hodnot jako předchozí charakteristiky. Nejvyšší hodnota koeficientu je v navrženém kvadratickém modelu. Grafická diagnostika (viz. příloha č.8) ukazuje u kvadratického modelu na průměrně dobrý odhad regresních koeficientů. Bod č. 1 se bodem vlivným,

body č. **7** a **17** jsou body odlehlými. Též verbální závěry regresních koeficientů jsou významné, kromě regresních členů b_2x_2 a $b_5x_5^2$ (viz. graf 4.9). Z výsledků lze soudit, že tato charakteristika má mnohem větší rozptyl dat než je u předešlých charakteristik z KESu. Grafy ostatních modelů jsou přiloženy v příloze č.8.



Graf 4.8: Y-predikce pro kvadratický model



Graf 4.9: Parciální regresní graf pro proměnnou $b_5x_5^2$

4.1.3.2 Návrh modelů pro charakteristiky z tloušťkoměru

Pro zjištění a vyšetření nejlepšího vícerozměrného lineárního regresního modelu pro povrchové charakteristiky z tloušťkoměru bylo postupováno stejně jako v kapitole 4.2 pro povrchové charakteristiky vyhodnocené Kawabatovým hodnotícím systémem.

Výstupními proměnnými pro vyčíslení odhadů neznámých parametrů regresních modelů z přístroje tloušťkoměr byla průměrná absolutní odchylka *MAD* a desetibodový průměr *TP*, který je také dalším častým používaným parametrem pro vyjádření drsnosti. Tyto charakteristiky byly vybrány na základě výsledků z dvoufaktorové analýzy, jelikož více či méně ovlivňují typ snímačů a druh síťovin.

Pro modely bez transformace byly nalezeny odhady regresních koeficientů pro obě charakteristiky a dosazeny do regresních rovnic (viz. rovnice 27-29). Kvadratický model není uváděn pro jeho statistickou nevýznamnost.

$$MAD_{\text{bez transformace}} = 3,2507E-003 + 3,7814E-004 * T - 2,9227E-006 * D$$

$$MAD_{\text{lineární}} = 5,9205E-003 + 8,4366E-004 * T - 1,6311E-006 * D - 2,9023E-006 * T * D$$

$$TP_{\text{bez transformace}} = 1,9407E-002 + 1,4400E-003 * T - 1,1986E-005 * D$$

$$TP_{\text{lineární}} = 2,2873E-002 + 2,0441E-003 * T - 1,0309E-005 * D - 3,7679E-006 * T * D$$

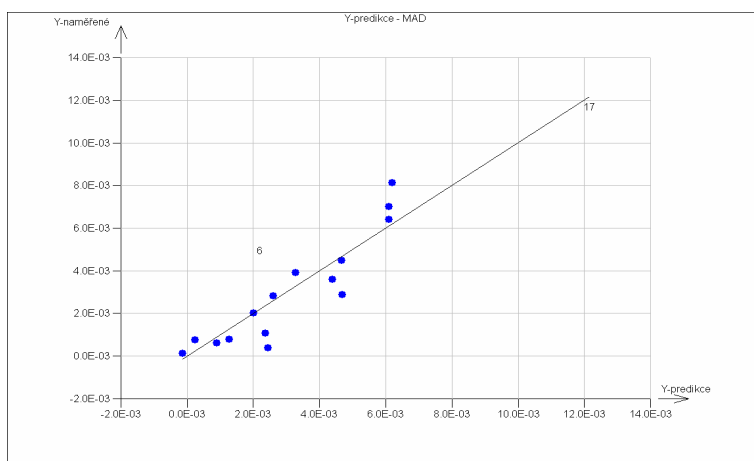
V tabulce 4.8 jsou uvedeny jejich statistické charakteristiky regrese.

Tabulka 4.8: Statistické charakteristiky regrese pro MAD a TP

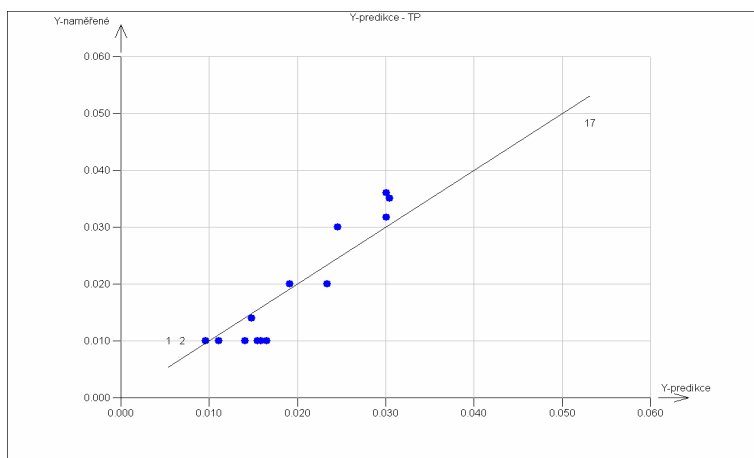
| Povrchové charakteristiky | MAD – bez transformace | MAD - lineární | TP –bez transformace | TP - lineární |
|---|------------------------|----------------|----------------------|---------------|
| Vícenásobný korelační koeficient R | 0,92666 | 0,93853 | 0,93482 | 0,93616 |
| Koeficient determinace R ² | 0,85870 | 0,88083 | 0,87388 | 0,87639 |
| Predikovaný korelační koeficient R _p | 0,55786 | 0,56359 | 0,09975 | 0,07861 |
| Střední kvadratická chyba predikce MEP | 2,4578E-006 | 2,42065E-006 | 9,8779E-005 | 1,0390E-004 |
| Akaikeho informační kritérium | -223,49 | -224,38 | -179,53 | -177,87 |

Zhodnocení modelů

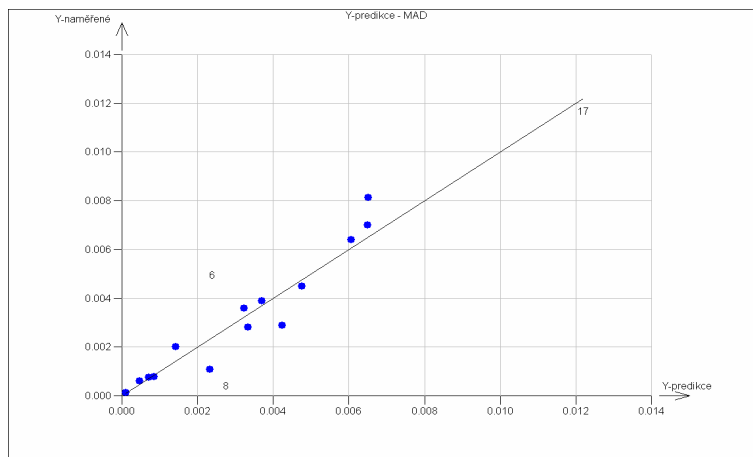
Z tabulky 4.8 je patrné, že mezi modely MAD a TP je jen malý rozdíl, vícenásobné koeficienty jsou statisticky významné. Ale přece jenom mají opět modely bez transformace méně odlehlých bodů (viz. příloha č.9). Bod č. 17 indikuje závislost dat, body č. 6 a č.1 jsou vybočující. V grafech 4.11 a 4.13 Y-predikce pro TP je vidět přímkový shluk bodů, jelikož pro některé síťoviny byly naměřeny stejné hodnoty.



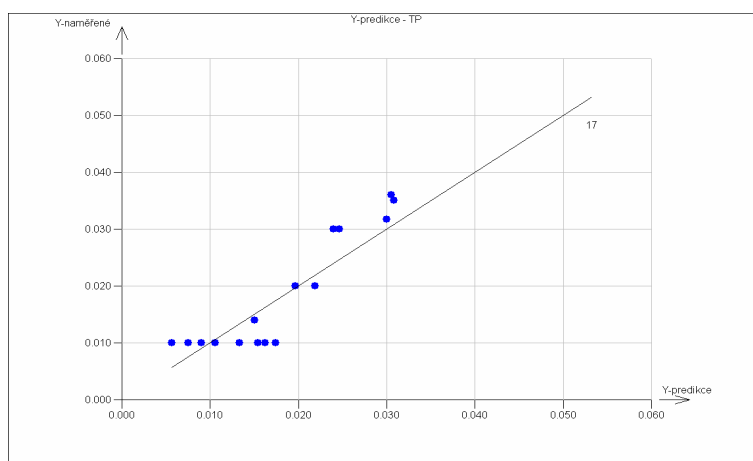
Graf 4.10: Y-predikce MAD pro model bez transformace



Graf 4.11: Y-predikce TP pro model bez transformace



Graf 4.12: Y-predikce MAD pro lineární model



Graf 4.13: Y-predikce TP pro lineární model

Cílem regresní analýzy bylo stanovit vliv jemnosti a dostavy na povrchové charakteristiky Kawabataho hodnotícího systému a tloušťkoměru. Vyšetřením navržených regresních modelů je zřejmé, že model, který nejvíce vykazoval lineární závislost je model bez transformace, i když proložení funkce není optimální. Zbývající dva modely ukazují na více odlehlých bodů a hlavně na nelinearitu členů b_3x_3 a také druhých mocnin (b_4x_4 a b_5x_5) nezávisle proměnných.

5 ZÁVĚR

Hlavním cílem této práce bylo porovnání dvou objektivních metod na hodnocení drsnosti povrchu. K tomuto experimentu bylo použito sedmnáct polyamidových síťovin s předpokladem stejnoměrných kruhových průřezů, tzn. byla zanedbána nestejnomyšlnost monofilů.

Pro tyto síťoviny bylo provedeno měření tloušťky (drsnosti) pomocí měřicího zařízení tloušťkoměru, pro snímání povrchu bylo využito dvou snímačů – slabého a silného. Získaná data byla vyhodnocena programem MATLAB. Druhým použitým přístrojem byl Kawabatův hodnotící systém KES, na kterém byly u síťovin proměřeny jejich mechanické vlastnosti (tahové, smykové, objemové, ohybové a povrchové).

U každé síťoviny byl změřen průměr monofilu s využitím obrazové analýzy, který dále sloužil k výpočtu jemnosti, byla spočítána dostava.

Naměřená data byla podrobena statistickému vyhodnocení programem QC.Expert. Jako první byla použita analýza rozptylu, kterou byl zjišťován vliv snímačů a druh síťoviny na naměřené povrchové charakteristiky z tloušťkoměru. Z výsledků této metody se ukázalo, že typ snímače nemá významný vliv na povrchové parametry, pouze druh síťoviny zaznamenal u některých charakteristik pozitivní vliv. Proto pro další hledání vztahů mezi veličinami byly použity ty charakteristiky, na které měly faktory vliv. Byla vybrána průměrná absolutní odchylka MAD a desetibodový průměr TP.

Jako druhá metoda pro objasnění závislosti mezi veličinami byl výpočet Spearmanova korelačního koeficientu pořadí, tzn. míra intenzity závislosti mezi statistickými charakteristikami silného a slabého snímače. Z výsledných koeficientů je zřejmé, že proměnné R_a , $R_{a,geom}$, MAD, MS, PS, PC a TP mezi sebou korelují, ale nedá se mluvit o funkční závislosti (hodnoty se příliš nepřibližují k +1 nebo -1). Počáteční fraktální rozměr D_{Fp} silného snímače koreluje s veličinami slabého snímače lépe než počáteční fraktální rozměr D_F slabého snímače. U variačního koeficientu CV slabého snímače je patrná pouze lineární závislost mezi aritmetickým průměrem, geometrickým průměrem a průměrnou absolutní odchylkou MAD silného snímače. Statistické charakteristiky průměrných fraktálních rozměrů D_F slabého a silného snímače mezi sebou nekorelují (není mezi nimi významná závislost). Dále byl sledován vztah mezi povrchovými charakteristikami obou snímačů a směrodatné odchylky geometrické

drsnosti SMD. Z korelačních koeficientů je dokázáno, že mezi proměnnými existuje dobrá závislost, pouze u fraktálních rozměrů je patrná méně intenzivní závislost.

Regresní analýzou byla sledována závislost mezi závisle proměnnou (povrchové charakteristiky vyhodnocené Kawabatovým systémem a tloušťkoměrem) a nezávisle proměnnými (jemností a dostavou síťovin). Při budování regresních modelů bylo použito metody nejmenších čtverců. Pro každou vysvětlovanou veličinu byly navrženy tři regresní modely – model bez transformace, lineární model a kvadratický model. Cílem bylo vyčíslení nejlepších odhadů regresních parametrů a nalezení té funkce, která je mezi těmito parametry “nejlépe proložena”.

Regresní grafy, tabulky a regresních parametry uvedené v *kapitolách 4.3.1.1 a 4.3.1.2* ukazují, že model, který se nejvíce blíží lineárnímu proložení je model bez transformace. U lineárních a kvadratických modelů je v grafech mnohem více odlehlých či vlivných bodů a korelace mezi proměnnými není tak vysoká, stejně tak odhady parametrů v druhých mocninách jsou statisticky nevýznamné. Porovnáním uvedených statistických metod povrchových charakteristik SMD, MIU a MMD z Kawabatova přístroje se statistickými charakteristikami MAD a TP z tloušťkoměru je zřejmé, že lepší metodou pro zjišťování drsnosti povrchu zkoumaných síťovin je systémem KES.

Tento závěr mohl být ovlivněn především vlastním měřením tloušťky na tloušťkoměru. Tato metoda je ovlivněná jak lidským, tak instrumentálním faktorem. Při vkládání vzorku pod čidlo (snímač) není zaručeno, že vzorek svírá se snímačem pravý úhel. Seběmenším vychýlením od osy dochází ke zkreslení měření. Také po konstrukční stránce má tloušťkoměr více nedostatků než systém KES. Při měření tloušťky hrubších síťovin snímače lépe reagují na nerovnoměrnost povrchu, pro jemnější síťoviny nebyly použité snímače pro zaznamenávání drsnosti povrchu dost citlivé. Z toho vyplývá, že výsledky měření jsou nedostačující pro příliš jemné a tenké materiály.

Doporučuji provést tento experiment pro jiné druhy materiálů, především pro materiály s více členitějším povrchem. Dobré by také bylo porovnání výsledků s jinými přístroji na měření drsnosti povrchu.

6 LITERATURA

- [1] KAWABATA, S.: The standardization and analysis of hand evaluation (2nd. Edition), The Textile Machinery Society of Japan, 1980
- [2] MILITKÝ, J.: Technické textilie – vybrané kapitoly, Liberec 2002
- [3] BUMBÁLEK a kol.: Drsnost povrchu, SNTL, Praha, 1989
- [4] MIKROSKOPIE ATOMOVÝCH SIL, [citace 21.4.04]. Dostupné na internetu: <http://www.fzu.cz/texty/brana/atomy/spm1.php>
- [5] ATOMIC FORCE MICROSCOPY, [citace 21.4.04]. Dostupné na internetu: <http://www.chembio.uoguelph.ca/educmat/chm729/afm/introdn.htm>
- [6] PACE - Particle & Colloid Engineering Group, School of Process, Environment and Materials Engineering, University of Leeds,, ATOMIC FORCE MICROSCOPY, [citace 19.12.04]. Dostupné na internetu: <http://www.pace.leeds.ac.uk/labs/afm.htm>
- [7] MILITKÝ, J.; BAJZÍK, V.: Surface roughness of heat protective clothing textiles, International Journal of Clothing Science and Technology, Vol. 15, No 3/4, 2003
- [8] MILITKÝ, J.; BAJZÍK, V.: Surface Roughness and Fractal Dimension, J. Text. Inst., 92, Part 3, 2001
- [9] TLOUŠŤKOMĚR SDL M 034/1, návod k obsluze, SDL International, Stockport, England
- [10] LUCIA G, Uživatelská příručka, Systém for Image Processing and Analysis, Laboratory Imaging
- [11] MELOUN, M.; MILITKÝ, J.: Statistické zpracování experimentálních dat, PLUS Praha, 1994
- [12] MELOUN, M.; MILITKÝ, J.: Kompédium statistického zpracování dat, Academia Praha, 2002
- [13] QC.Expert verze 2,7, Uživatelský manuál. [citace 20.12.04]. Dostupné na internetu: <http://www.trilobyte.cz>

7 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha č. 1 - Aritmetické průměry z 13ti statistických charakteristik vypočítaných Matlabem pro slabý snímač

Příloha č. 2 - Aritmetické průměry z 13ti statistických charakteristik vypočítaných Matlabem pro silný snímač

Příloha č. 3 - Statistické vyhodnocení mechanických vlastností naměřených Kawabatovým hodnotícím systémem

Příloha č. 4 - Rozptylové grafy vzájemných párových vztahů mezi povrchovými charakteristikami silného a slabého snímače a SMD

Příloha č. 5 - Spearmanovy korelační koeficienty mezi povrchovými charakteristikami slabého a silného snímače

Příloha č. 6 - Lineární a kvadratický regresní model pro směrodatnou odchylku geometrické drsnosti

Příloha č. 7 - Lineární, kvadratický model a model bez transformace pro směrodatnou odchylku koeficientu tření.

Příloha č. 8 - Lineární, kvadratický model a model bez transformace pro střední hodnoty koeficientu tření

Příloha č. 9 - Lineární model a model bez transformace pro průměrnou absolutní odchylku MAD

Příloha č. 10 - Lineární model a model bez transformace pro desetibodový průměr TP

Příloha č. 11 – Vzorčky síťovin

Příloha č. 1

Tabulka č. 1: Střední hodnoty statistických charakteristik měřených slabým snímačem

| Druh síťoviny | MAD [mm] | MS [mm] | PS [mm] | PC [mm] | TP [mm] | CV [%] | D _{Fp} [-] | D _F [-] |
|---------------|----------|----------|----------|----------|---------|--------|---------------------|--------------------|
| 130T | 1,14E-04 | 1,15E-04 | 1,15E-06 | 2,30E-04 | 0,010 | 1,884 | 1,495 | 1,436 |
| 120T | 7,61E-04 | 5,55E-04 | 5,55E-06 | 1,76E-05 | 0,010 | 0,419 | 1,950 | 1,941 |
| 100T | 6,09E-04 | 3,44E-04 | 5,98E-06 | 6,90E-04 | 0,010 | 2,193 | 1,499 | 1,926 |
| 90T | 7,68E-04 | 3,15E-04 | 3,15E-06 | 6,03E-04 | 0,010 | 2,820 | 1,499 | 1,482 |
| 74T | 2,01E-03 | 1,14E-03 | 1,14E-05 | 2,28E-03 | 0,010 | 5,713 | 1,959 | 1,970 |
| 67M | 4,94E-03 | 5,54E-04 | 5,54E-06 | 1,11E-03 | 0,014 | 9,129 | 1,934 | 1,931 |
| 63M | 1,08E-03 | 5,73E-04 | 5,73E-06 | 1,15E-03 | 0,010 | 3,838 | 1,917 | 1,934 |
| 59S | 3,92E-04 | 4,01E-04 | 4,01E-06 | 8,05E-04 | 0,010 | 2,329 | 2,001 | 1,985 |
| 53S | 2,81E-03 | 7,81E-04 | 7,81E-06 | 1,56E-03 | 0,010 | 6,317 | 1,921 | 1,937 |
| 45S | 3,90E-03 | 1,09E-03 | 1,09E-05 | 2,17E-03 | 0,020 | 5,857 | 1,748 | 1,839 |
| 39M | 3,59E-03 | 1,15E-03 | 1,15E-05 | 2,30E-03 | 0,020 | 4,141 | 1,885 | 1,915 |
| 35S | 2,88E-03 | 1,42E-03 | 2,01E-05 | 2,79E-03 | 0,030 | 4,058 | 1,789 | 1,908 |
| 32S | 4,48E-03 | 1,44E-03 | 2,09E-05 | 2,57E-03 | 0,030 | 5,385 | 1,754 | 1,919 |
| 28S | 6,39E-03 | 2,13E-03 | 3,39E-05 | 3,67E-03 | 0,032 | 5,779 | 1,683 | 1,874 |
| 26S | 8,13E-03 | 2,09E-03 | 3,29E-05 | 4,07E-03 | 0,035 | 7,277 | 1,549 | 1,817 |
| 25S | 6,99E-03 | 1,71E-03 | 2,53E-05 | 3,24E-03 | 0,036 | 5,946 | 1,569 | 1,814 |
| 19M | 1,17E-02 | 3,24E-03 | 5,59E-05 | 6,32E-03 | 0,048 | 5,184 | 1,632 | 1,782 |

Tabulka č. 2: Střední hodnoty statistických charakteristik měřených slabým snímačem

| Druh síťoviny | R _a [mm] | R _{a(geom)} [mm] | Rozptyl [mm ²] | Šikmost | Špičatost |
|---------------|---------------------|---------------------------|----------------------------|---------|-----------|
| 130T | 0,040 | 0,040 | 1,26E-31 | 0,996 | 0,994 |
| 120T | 0,050 | 0,050 | 4,40E-08 | -0,999 | 2,187 |
| 100T | 0,070 | 0,070 | 3,05E-06 | 0,999 | 3,987 |
| 90T | 0,060 | 0,060 | 2,55E-30 | -0,999 | 0,999 |
| 74T | 0,059 | 0,059 | 1,08E-05 | -0,445 | 7,038 |
| 67M | 0,056 | 0,056 | 2,47E-05 | 0,220 | 2,319 |
| 63M | 0,061 | 0,061 | 5,40E-06 | 0,996 | 8,660 |
| 59S | 0,060 | 0,060 | 1,99E-06 | 4,874 | 15,472 |
| 53S | 0,061 | 0,061 | 1,44E-05 | 0,650 | 4,237 |
| 45S | 0,085 | 0,085 | 2,48E-05 | -0,182 | 2,694 |
| 39M | 0,101 | 0,101 | 2,05E-05 | 1,242 | 3,762 |
| 35S | 0,111 | 0,111 | 2,05E-05 | 0,893 | 10,144 |
| 32S | 0,113 | 0,113 | 3,69E-05 | 2,151 | 6,840 |
| 28S | 0,134 | 0,134 | 6,22E-05 | 1,570 | 4,991 |
| 26S | 0,137 | 0,136 | 9,90E-05 | 1,060 | 3,361 |
| 25S | 0,147 | 0,147 | 7,68E-05 | 0,908 | 3,005 |
| 19M | 0,256 | 0,256 | 1,80E-04 | 0,308 | 1,827 |

Příloha č. 2

Tabulka č. 3: Střední hodnoty statistických charakteristik měřených silným snímačem

| Druh síťoviny | MAD [mm] | MS [mm] | PS [mm] | PC [mm] | TP [mm] | CV [%] | D _{Fp} [-] | D _F [-] |
|---------------|----------|----------|----------|----------|---------|--------|---------------------|--------------------|
| 130T | 1,06E-03 | 4,29E-04 | 4,29E-06 | 8,57E-04 | 0,008 | 3,205 | 1,870 | 1,861 |
| 120T | 2,60E-03 | 7,43E-04 | 7,68E-06 | 1,75E-03 | 0,008 | 5,972 | 1,833 | 1,815 |
| 100T | 2,14E-03 | 4,70E-04 | 5,50E-06 | 1,10E-03 | 0,007 | 3,985 | 1,864 | 1,847 |
| 90T | 1,56E-03 | 8,42E-04 | 1,13E-05 | 1,69E-03 | 0,006 | 2,531 | 1,787 | 1,721 |
| 74T | 8,97E-04 | 4,64E-04 | 7,85E-06 | 9,25E-04 | 0,004 | 1,791 | 1,761 | 1,734 |
| 67M | 1,68E-03 | 5,74E-04 | 7,16E-06 | 1,29E-03 | 0,004 | 3,587 | 1,646 | 1,614 |
| 63M | 1,09E-03 | 4,01E-04 | 2,83E-04 | 6,53E-04 | 0,012 | 3,055 | 1,930 | 1,937 |
| 59S | 1,62E-03 | 8,35E-04 | 1,03E-05 | 1,67E-03 | 0,010 | 3,512 | 1,941 | 1,953 |
| 53S | 3,19E-03 | 9,57E-04 | 1,12E-05 | 1,91E-03 | 0,010 | 5,206 | 1,885 | 1,924 |
| 45S | 3,55E-03 | 1,07E-03 | 1,14E-05 | 2,20E-03 | 0,010 | 4,619 | 1,797 | 1,870 |
| 39M | 4,23E-03 | 7,07E-04 | 9,72E-06 | 1,27E-03 | 0,020 | 4,782 | 1,801 | 1,892 |
| 35S | 4,66E-03 | 1,37E-03 | 1,56E-05 | 2,74E-03 | 0,019 | 4,611 | 1,629 | 1,849 |
| 32S | 4,43E-03 | 1,23E-03 | 1,55E-05 | 2,46E-03 | 0,028 | 4,177 | 1,799 | 1,847 |
| 28S | 5,21E-03 | 1,68E-03 | 2,62E-05 | 3,41E-03 | 0,026 | 3,918 | 1,762 | 1,889 |
| 26S | 5,91E-03 | 1,88E-03 | 3,20E-05 | 4,02E-03 | 0,032 | 5,129 | 1,669 | 1,853 |
| 25S | 8,25E-03 | 1,58E-03 | 2,25E-05 | 3,04E-03 | 0,048 | 6,467 | 1,569 | 1,823 |
| 19M | 1,14E-02 | 1,61E-03 | 1,65E-05 | 3,09E-03 | 0,036 | 4,705 | 1,383 | 1,681 |

Tabulka č. 4: Střední hodnoty statistických charakteristik měřených silným snímačem

| Druh síťoviny | R _a [mm] | R _{a(geom)} [mm] | Rozptyl [mm ²] | Šikmost | Špičatost |
|---------------|---------------------|---------------------------|----------------------------|---------|-----------|
| 130T | 0,056 | 0,056 | 5,33E-06 | -5,322 | 99,583 |
| 120T | 0,055 | 0,055 | 1,3E-05 | -0,035 | 3,473 |
| 100T | 0,065 | 0,065 | 1,07E-05 | -6,492 | 228,781 |
| 90T | 0,050 | 0,077 | 7,82E-06 | -0,903 | 11,106 |
| 74T | 0,075 | 0,075 | 4,50E-06 | 2,988 | 74,084 |
| 67M | 0,070 | 0,070 | 8,13E-06 | -0,857 | 1,465 |
| 63M | 0,069 | 0,069 | 6,09E-06 | 4,681 | 69,741 |
| 59S | 0,069 | 0,068 | 6,88E-06 | 4,230 | 50,544 |
| 53S | 0,068 | 0,068 | 1,39E-05 | 2,153 | 7,923 |
| 45S | 0,090 | 0,090 | 1,8E-05 | 0,901 | 3,688 |
| 39M | 0,110 | 0,109 | 3,76E-05 | 2,455 | 10,511 |
| 35S | 0,121 | 0,121 | 3,18E-05 | 0,948 | 3,496 |
| 32S | 0,131 | 0,131 | 2,97E-05 | 0,612 | 4,196 |
| 28S | 0,160 | 0,160 | 4,13E-05 | 1,857 | 7,000 |
| 26S | 0,153 | 0,153 | 6,68E-05 | 0,688 | 5,056 |
| 25S | 0,151 | 0,151 | 9,67E-05 | 0,751 | 3,274 |
| 19M | 0,269 | 0,269 | 1,61E-04 | 0,077 | 1,578 |

Příloha č. 3

Tabulka č. 5: Statistické vyhodnocení tahových charakteristik z přístroje KES –FB1

| Druh síťoviny | Střední hodnoty pro osnovu a útek | | | Směrodatné odchylky pro osnovu a útek | | |
|---------------|-----------------------------------|----------------------------|--------|---------------------------------------|----------------------------|--------|
| | LT [-] | WT [N.cm/cm ²] | RT [%] | LT [-] | WT [N.cm/cm ²] | RT [%] |
| 19M | 1,125 | 2,812 | 88,442 | 0,016 | 0,215 | 1,342 |
| 25S | 1,053 | 4,115 | 87,512 | 0,006 | 0,698 | 2,899 |
| 26S | 1,044 | 4,493 | 83,887 | 0,023 | 0,648 | 2,126 |
| 28S | 1,051 | 3,772 | 89,443 | 0,005 | 0,485 | 2,755 |
| 32S | 1,074 | 4,730 | 85,518 | 0,013 | 1,188 | 5,081 |
| 35S | 1,061 | 4,320 | 85,970 | 0,026 | 0,405 | 2,009 |
| 39M | 1,057 | 4,215 | 86,500 | 0,024 | 0,679 | 3,438 |
| 45S | 1,084 | 6,623 | 77,558 | 0,039 | 2,519 | 9,739 |
| 53S | 1,133 | 8,977 | 66,250 | 0,011 | 0,136 | 1,385 |
| 59S | 1,116 | 8,205 | 69,168 | 0,024 | 1,161 | 3,521 |
| 63M | 1,123 | 8,925 | 67,613 | 0,013 | 2,855 | 5,498 |
| 67M | 1,107 | 7,605 | 70,710 | 0,014 | 0,702 | 1,863 |
| 74T | 1,089 | 7,015 | 73,857 | 0,010 | 1,176 | 3,694 |
| 90T | 1,048 | 5,963 | 79,792 | 0,012 | 0,595 | 2,545 |
| 100T | 1,033 | 5,660 | 81,107 | 0,015 | 0,108 | 0,832 |
| 120T | 1,085 | 8,127 | 72,067 | 0,023 | 2,298 | 6,274 |
| 130T | 1,097 | 8,012 | 69,883 | 0,026 | 1,268 | 4,303 |

Tabulka č. 6: Statistické vyhodnocení smykových charakteristik z přístroje KES –FB1

| Druh síťoviny | Střední hodnoty pro osnovu a útek | | | Směrodatné odchylky pro osnovu a útek | | |
|---------------|-----------------------------------|------------|-------------|---------------------------------------|------------|-------------|
| | G [N/cm.°] | 2HG [N/cm] | 2HG5 [N/cm] | G [N/cm.°] | 2HG [N/cm] | 2HG5 [N/cm] |
| 19M | 7,022 | 23,643 | 23,828 | 0,608 | 1,318 | 1,918 |
| 25S | 1,002 | 2,437 | 3,255 | 0,097 | 0,073 | 0,108 |
| 26S | 1,290 | 4,732 | 5,433 | 0,157 | 0,392 | 0,521 |
| 28S | 1,723 | 3,958 | 6,035 | 0,165 | 0,359 | 0,578 |
| 32S | 1,205 | 2,557 | 5,377 | 0,122 | 0,077 | 0,313 |
| 35S | 1,148 | 2,103 | 4,933 | 0,152 | 0,069 | 0,340 |
| 39M | 3,457 | 6,963 | 12,132 | 0,265 | 0,134 | 0,296 |
| 45S | 0,977 | 2,298 | 3,825 | 0,113 | 0,099 | 0,226 |
| 53S | 0,618 | 1,572 | 2,320 | 0,043 | 0,154 | 0,124 |
| 59S | 0,840 | 4,355 | 4,010 | 0,146 | 0,271 | 0,247 |
| 63M | 1,578 | 6,688 | 6,685 | 0,234 | 0,343 | 0,496 |
| 67M | 1,648 | 3,295 | 6,727 | 0,125 | 0,372 | 0,484 |
| 74T | 2,810 | 6,145 | 9,203 | 0,264 | 0,307 | 0,760 |
| 90T | 0,763 | 3,342 | 3,488 | 0,084 | 0,432 | 0,126 |
| 100T | 1,655 | 4,185 | 5,565 | 0,036 | 0,590 | 0,310 |
| 120T | 1,282 | 4,433 | 5,145 | 0,091 | 0,486 | 0,422 |
| 130T | 1,735 | 3,647 | 5,710 | 0,131 | 0,287 | 0,401 |

Tabulka č. 7: Statistické vyhodnocení ohybových charakteristik z přístroje KES –FB2

| Druh síťoviny | Střední hodnoty pro osnovu a útek | | Směrodatné odchylky pro osnovu a útek | |
|------------------|-----------------------------------|------------------|---------------------------------------|------------------|
| | B [N.cm/cm ²] | 2HB [N.cm/cm] | B [N.cm/cm ²] | 2HB [N.cm/cm] |
| 19M | 3,210 | 0,642 | 9,41E-02 | 3,37E-02 |
| 25S | 0,557 | 0,210 | 1,20E-02 | 1,09E-02 |
| 26S | 0,491 | 0,206 | 2,38E-02 | 1,18E-02 |
| 28S | 0,569 | 0,216 | 2,32E-02 | 1,07E-02 |
| 32S | 0,343 | 0,104 | 1,49E-02 | 6,53E-03 |
| 35S | 0,354 | 0,109 | 6,59E-03 | 4,02E-03 |
| 39M | 0,357 | 0,115 | 1,64E-02 | 7,86E-03 |
| 45S | 0,131 | 0,043 | 1,34E-02 | 2,58E-03 |
| 53S | 0,066 | 0,021 | 4,76E-03 | 9,22E-04 |
| 59S | 0,069 | 0,021 | 4,67E-03 | 1,01E-03 |
| 63M | 0,084 | 0,029 | 1,23E-02 | 6,67E-03 |
| 67M | 0,074 | 0,025 | 8,56E-03 | 1,87E-03 |
| 74T | 0,085 | 0,028 | 2,16E-03 | 2,29E-03 |
| 90T | 0,075 | 0,025 | 2,20E-03 | 3,21E-03 |
| 100T | 0,082 | 0,024 | 5,28E-03 | 2,95E-03 |
| 120T | 0,042 | 0,015 | 2,00E-03 | 5,71E-04 |
| 130T | 0,044 | 0,015 | 2,11E-03 | 1,44E-03 |

Tabulka č. 8: Statistické vyhodnocení objemových charakteristik z přístroje KES –FB3

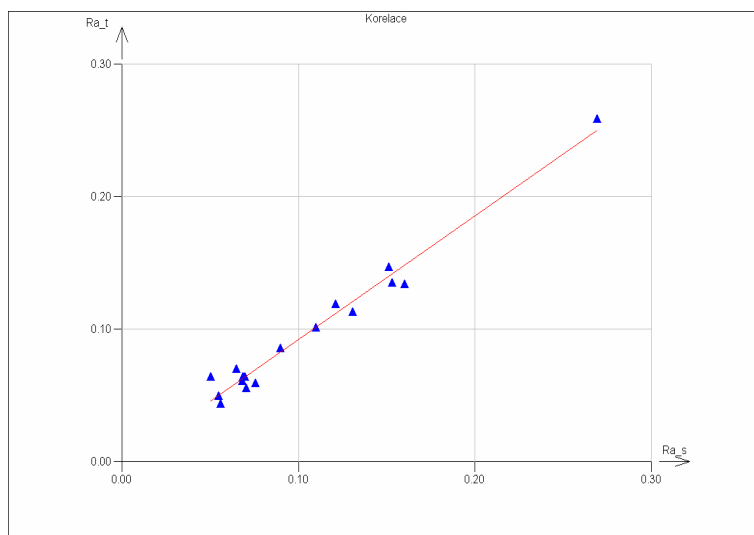
| Druh síťovin | Aritmetické průměry | | | Směrodatné odchylky | | |
|-----------------|---------------------|-------------------------------|-----------|---------------------|-------------------------------|-----------|
| | LC [-] | WC [N.cm/cm ²] | RC [%] | LC [-] | WC [N.cm/cm ²] | RC [%] |
| 19M | 0,544 | 0,033 | 95,513 | 0,095 | 0,006 | 7,054 |
| 45S | 0,404 | 0,027 | 155,533 | 0,288 | 0,006 | 18,569 |
| 74T | 1,143 | 0,020 | 195,500 | 0,426 | 0 | 12,217 |
| 130T | 0,676 | 0,020 | 179,267 | 0,313 | 0 | 8,424 |

Tabulka č. 9: Statistické vyhodnocení povrchových charakteristik z přístroje KES –FB4

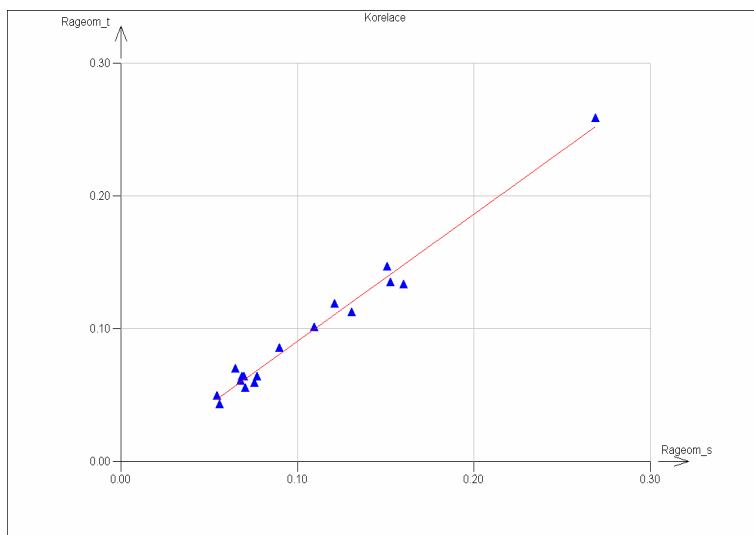
| Druh síťoviny | Směrodatné odchylky pro osnovu a útek | | |
|--------------------------|--|----------------|---------------------------------------|
| | MIU [-] | MMD [-] | SMD [μm] |
| 19M | 3,26E-02 | 2,98E-02 | 1,51E+00 |
| 25S | 8,44E-03 | 1,29E-02 | 3,62E+00 |
| 26S | 1,87E-03 | 4,08E-03 | 1,70E+00 |
| 28S | 1,10E-02 | 1,81E-02 | 2,35E+00 |
| 32S | 6,52E-03 | 5,09E-03 | 2,45E-01 |
| 35S | 2,43E-03 | 6,06E-03 | 6,95E-01 |
| 39M | 2,45E-02 | 2,29E-02 | 5,12E-01 |
| 45S | 4,86E-03 | 1,49E-02 | 4,11E-01 |
| 53S | 1,47E-03 | 1,21E-03 | 1,88E-01 |
| 59S | 5,02E-03 | 6,23E-03 | 1,96E-01 |
| 63M | 5,28E-03 | 6,38E-03 | 5,32E-01 |
| 67M | 3,76E-03 | 8,83E-03 | 1,62E-01 |
| 74T | 4,84E-03 | 6,60E-03 | 1,94E-01 |
| 90T | 9,95E-03 | 2,58E-03 | 8,90E-02 |
| 100T | 5,68E-03 | 5,16E-03 | 1,11E-01 |
| 120T | 5,32E-03 | 2,66E-03 | 1,29E-01 |
| 130T | 5,93E-03 | 2,00E-03 | 9,26E-02 |

Příloha č. 4

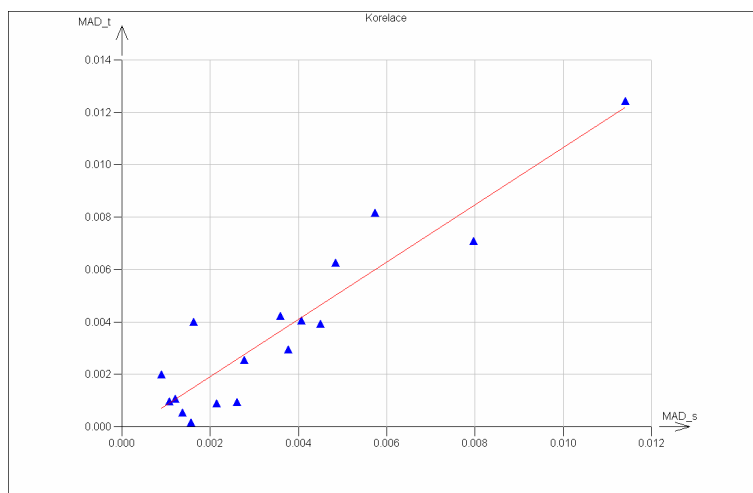
Graf č. 1: Vzájemné párové vztahy mezi aritmetickým průměrem silného (R_{a_s}) a slabého snímače (R_{a_t})



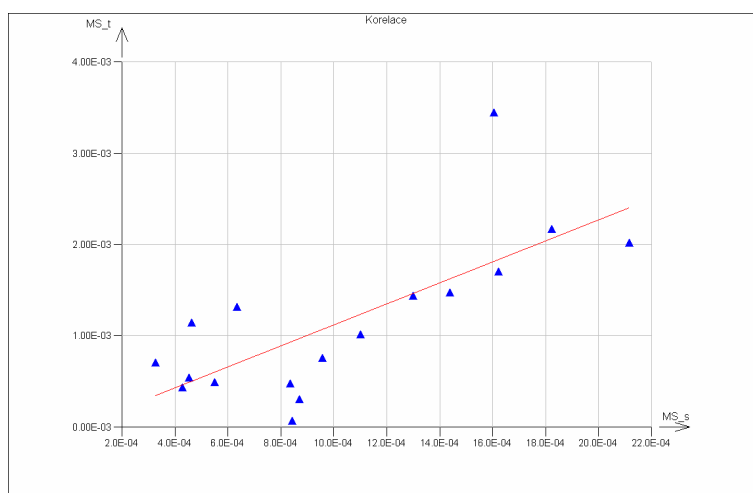
Graf č. 2: Vzájemné párové vztahy mezi geometrickým průměrem silného ($R_{a(geom)_s}$) a slabého snímače ($R_{a(geom)_t}$)



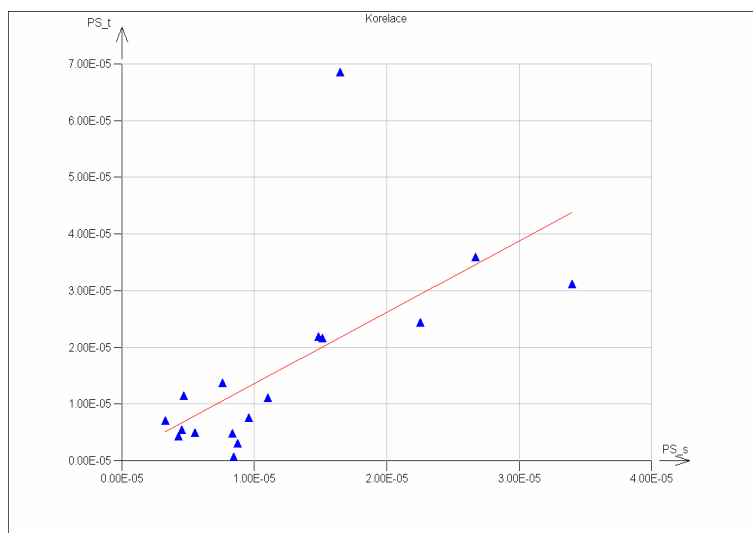
Graf č. 3: Vzájemné párové vztahy mezi průměrnou absolutní odchylkou silného (MAD_s) a slabého snímače (MAD_t)



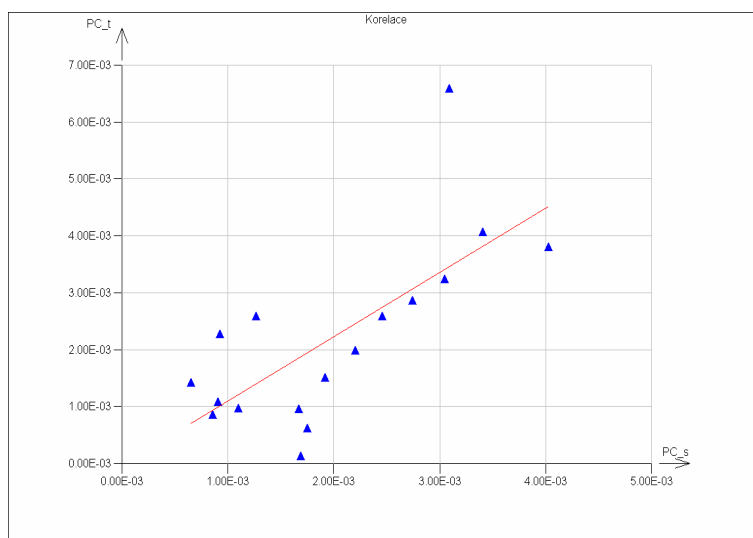
Graf č. 4: Vzájemné párové vztahy mezi průměrnou směrnici silného (MS_s) a slabého snímače (MS_t)



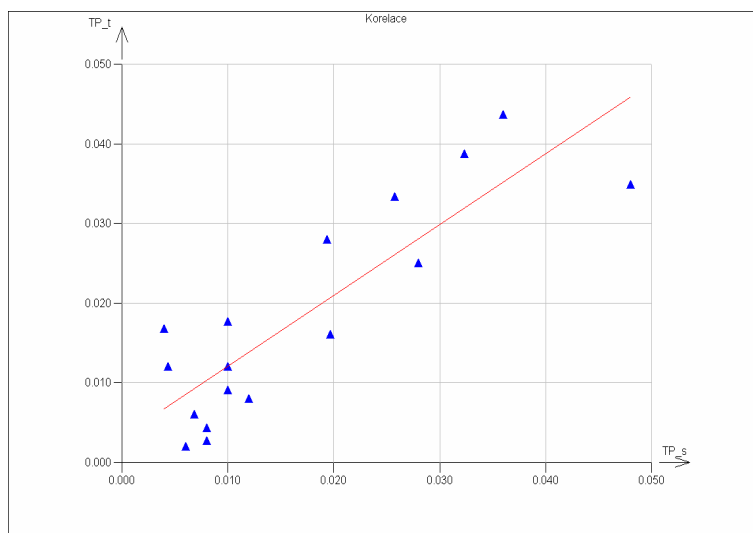
Graf č. 5: Vzájemné párové vztahy mezi průměrnou čtvercovou směrnicí silného (PS_s) a slabého snímače (PS_t)



Graf č. 6: Vzájemné párové vztahy mezi průměrnou křivostí silného (PC_s) a slabého snímače (PC_t)



Graf č. 7: Vzájemné párové vztahy mezi průměrem deseti bodů silného (TP_s) a slabého snímače (TP_t)



Příloha č. 5

Tabulka č. 10: Spearmanovy koeficienty mezi povrchovými charakteristikami slabého snímače

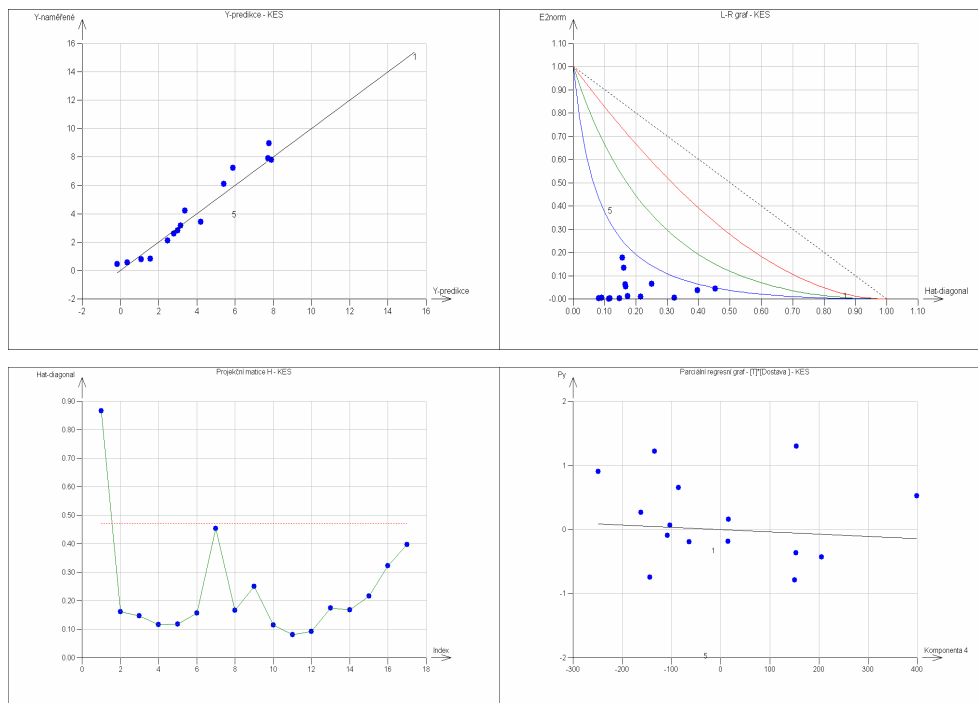
| | | | | | | | | | |
|----------------------|----------------------------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------------------|----------------------|
| R_a | 1 | 0,725 | 0,848 | 0,848 | 0,846 | 0,833 | 0,400 | -0,539 | -0,034 |
| 1 | R_{a(geom)} | 0,725 | 0,848 | 0,848 | 0,846 | 0,833 | 0,400 | -0,539 | -0,034 |
| 0,725 | 0,725 | MAD | 0,895 | 0,895 | 0,887 | 0,946 | 0,850 | -0,458 | 0,120 |
| 0,848 | 0,848 | 0,895 | MS | 1,000 | 0,998 | 0,944 | 0,686 | -0,355 | 0,213 |
| 0,848 | 0,848 | 0,895 | 1,000 | PS | 0,998 | 0,944 | 0,686 | -0,355 | 0,213 |
| 0,846 | 0,846 | 0,887 | 0,998 | 0,998 | PC | 0,936 | 0,681 | -0,346 | 0,208 |
| 0,833 | 0,833 | 0,946 | 0,944 | 0,944 | 0,936 | TP | 0,784 | -0,355 | 0,262 |
| 0,400 | 0,400 | 0,850 | 0,686 | 0,686 | 0,681 | 0,784 | CV | -0,169 | 0,390 |
| -0,539 | -0,539 | -0,458 | -0,355 | -0,355 | -0,346 | -0,355 | -0,169 | D_{Fp} | 0,723 |
| -0,034 | -0,034 | 0,120 | 0,213 | 0,213 | 0,208 | 0,262 | 0,390 | 0,723 | D_F |

Tabulka č. 11: Spearmanovy koeficienty mezi povrchovými charakteristikami silného snímače

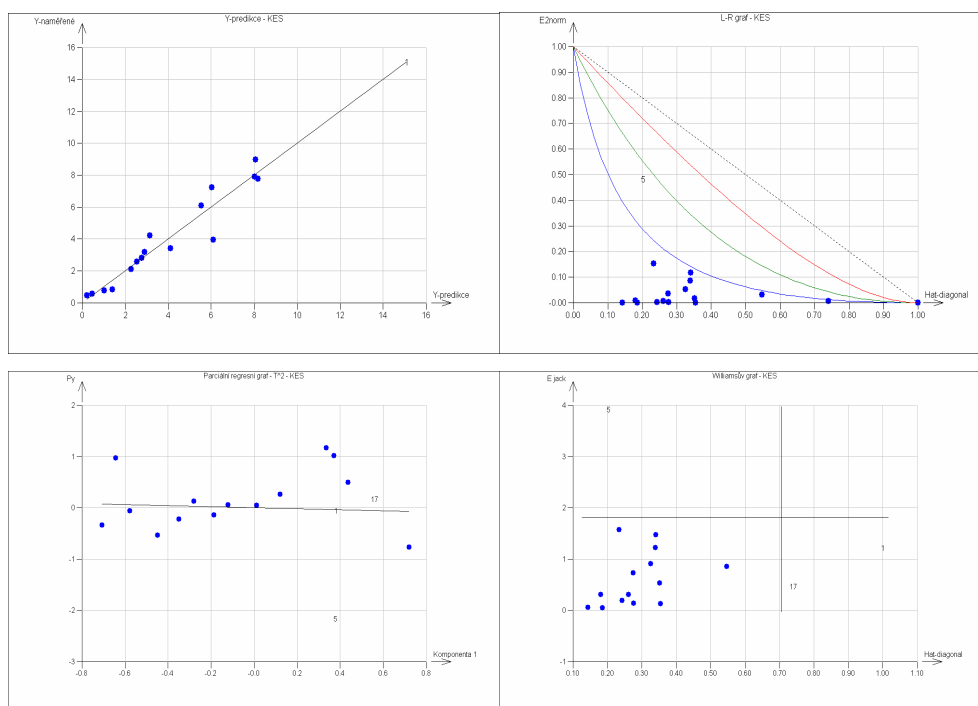
| | | | | | | | | | |
|----------------------|----------------------------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------------------|----------------------|
| R_a | 0,912 | 0,784 | 0,689 | 0,691 | 0,696 | 0,782 | 0,319 | -0,654 | -0,020 |
| 0,912 | R_{a(geom)} | 0,784 | 0,745 | 0,748 | 0,752 | 0,730 | 0,216 | -0,735 | -0,147 |
| 0,784 | 0,784 | MAD | 0,890 | 0,887 | 0,892 | 0,804 | 0,716 | -0,610 | -0,100 |
| 0,689 | 0,745 | 0,890 | MS | 0,998 | 0,998 | 0,711 | 0,618 | -0,554 | -0,054 |
| 0,691 | 0,748 | 0,887 | 0,998 | PS | 0,995 | 0,718 | 0,615 | -0,537 | -0,056 |
| 0,696 | 0,752 | 0,892 | 0,998 | 0,995 | PC | 0,708 | 0,605 | -0,556 | -0,064 |
| 0,782 | 0,730 | 0,804 | 0,711 | 0,718 | 0,708 | TP | 0,591 | -0,304 | 0,267 |
| 0,319 | 0,216 | 0,716 | 0,618 | 0,615 | 0,605 | 0,591 | CV | -0,145 | 0,125 |
| -0,654 | -0,735 | -0,610 | -0,554 | -0,537 | -0,556 | -0,304 | -0,145 | D_{Fp} | 0,672 |
| -0,020 | -0,147 | -0,100 | -0,054 | -0,056 | -0,064 | 0,267 | 0,125 | 0,672 | D_F |

Příloha č. 6

Grafy č. 8: Grafická analýza lineárního modelu pro směrodatnou odchylku geometrické drsnosti SMD

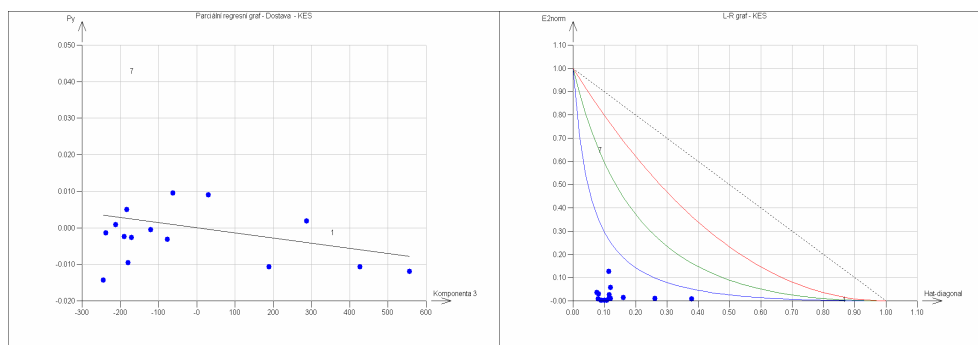


Grafy č. 9: Grafická analýza kvadratického modelu pro směrodatnou odchylku geometrické drsnosti SMD

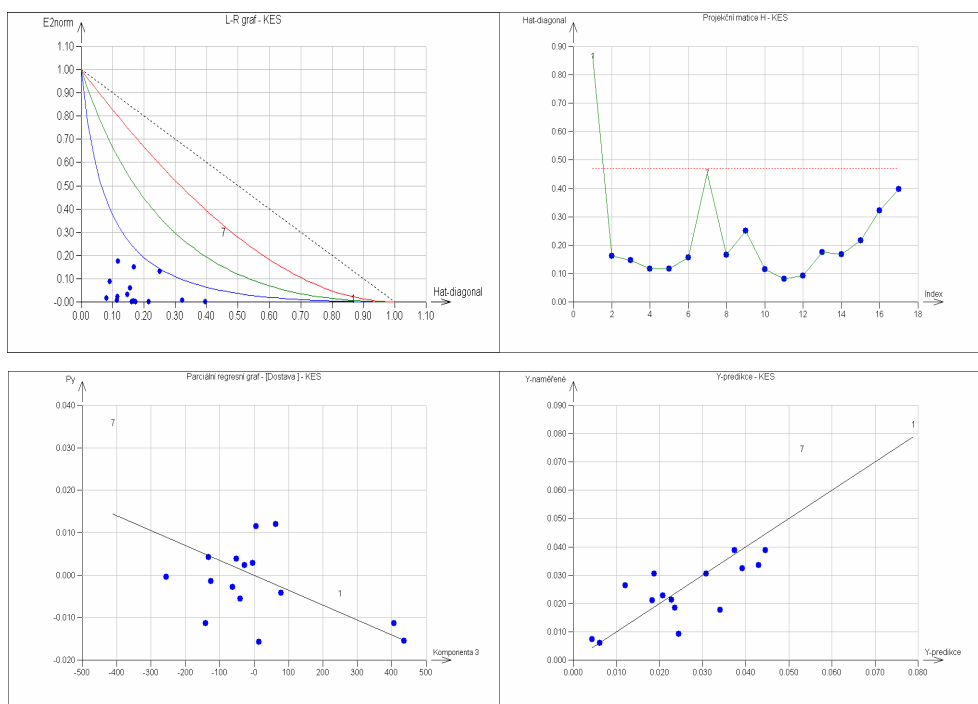


Příloha č. 7

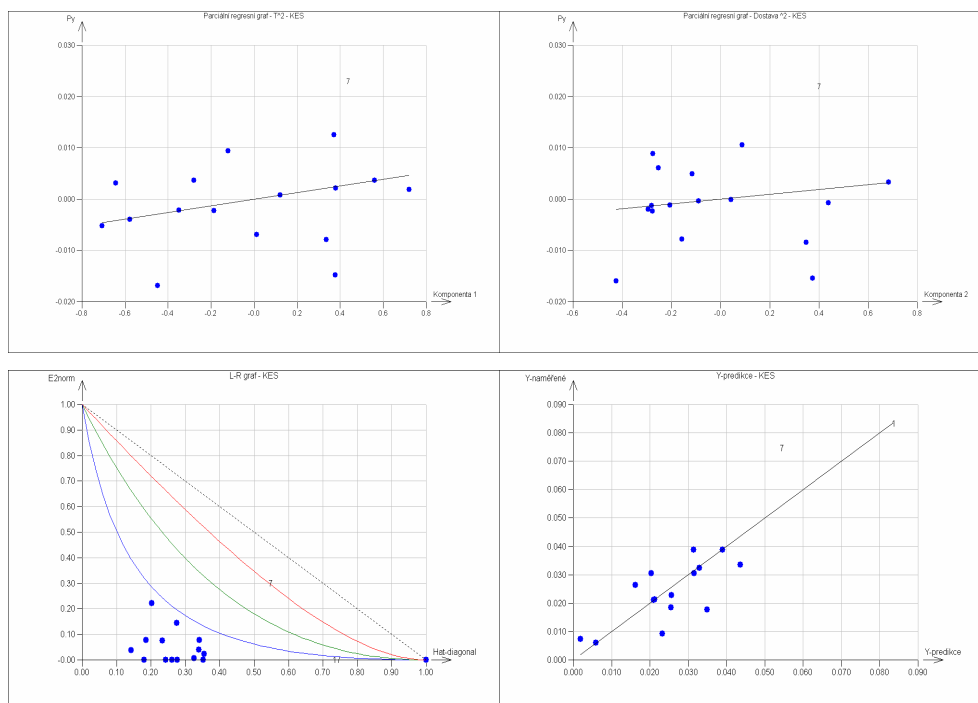
Grafy č. 10: Grafická analýza modelu bez transformace pro směrodatnou odchylku koeficientu tření, MMD



Grafy č. 11: Grafická analýza lineárního modelu směrodatné odchylky koeficientu tření, MMD

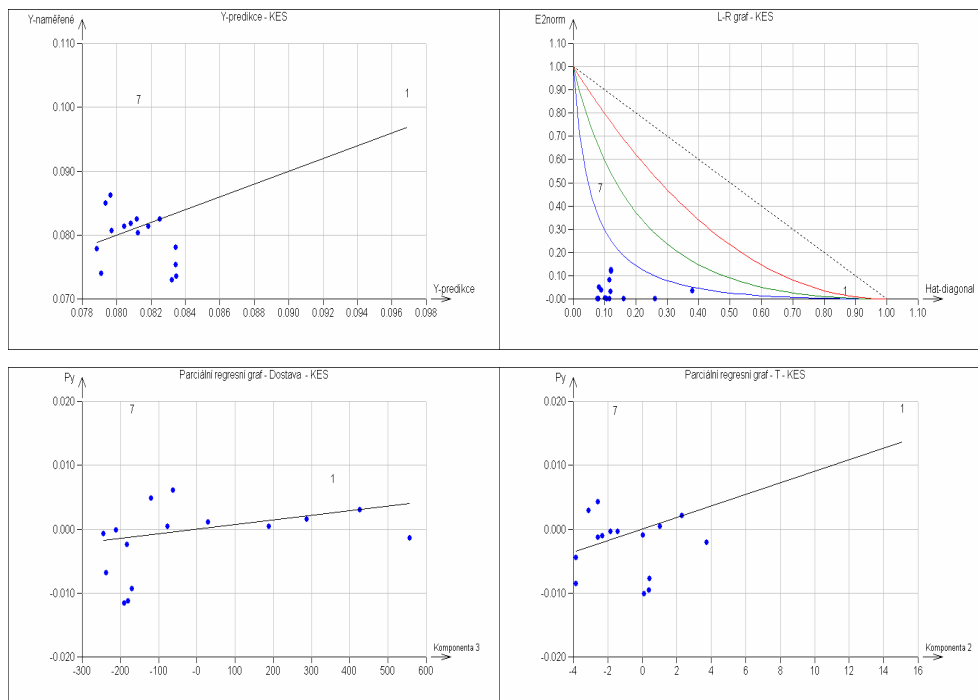


Grafy č. 12: Grafická analýza kvadratického modelu směřované odchylky koeficientu
tření. MMD

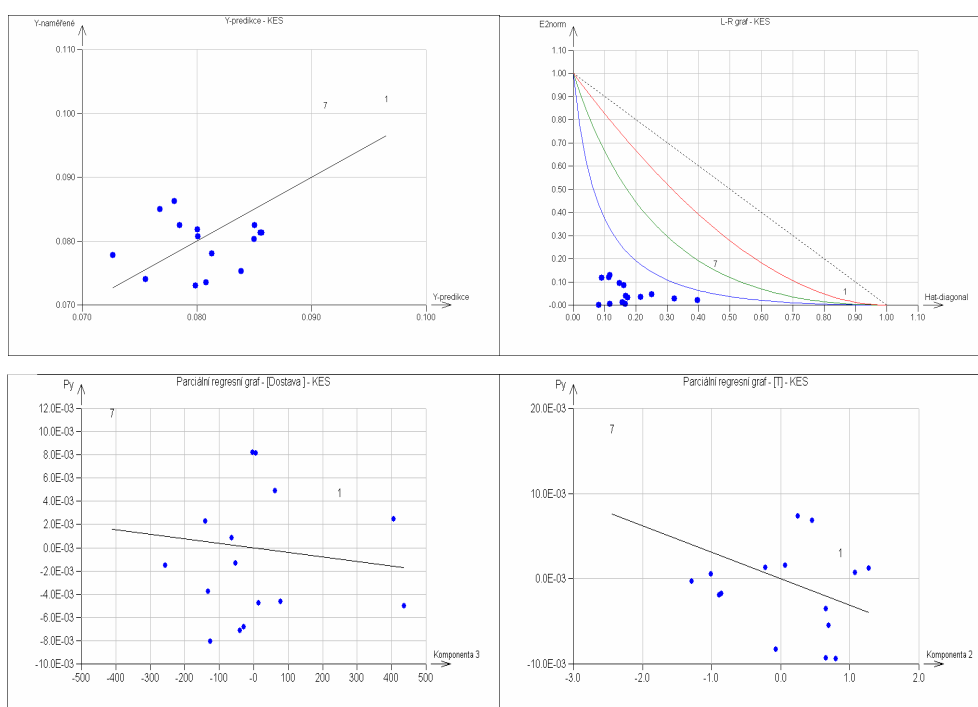


Příloha č. 8

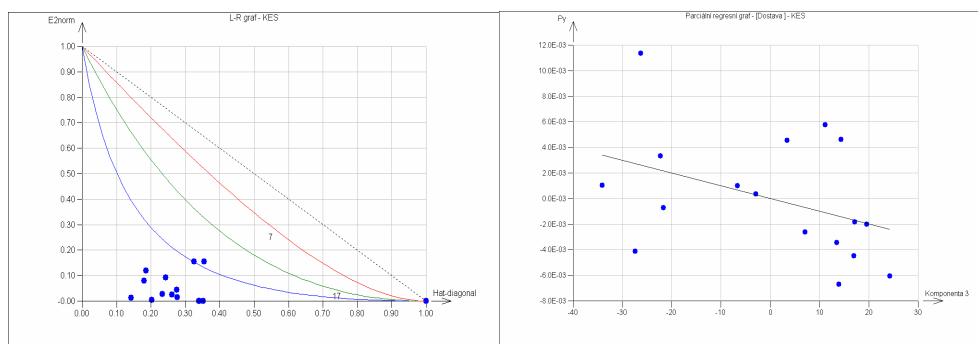
Grafy č. 13: Grafická analýza modelu bez transformace střední hodnoty koeficientu tření MIU



Grafy č. 14: Grafická analýza lineárního modelu střední hodnoty koeficientu tření MIU

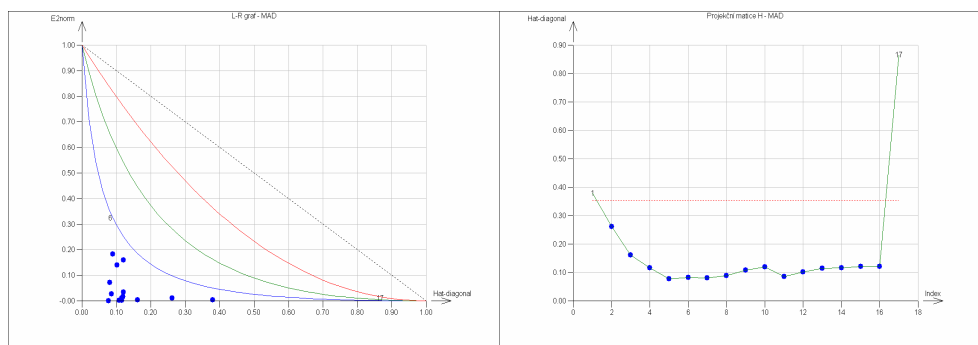


Grafy č. 15: Grafická analýza kvadratického modelu střední hodnoty koeficientu tření
MIU

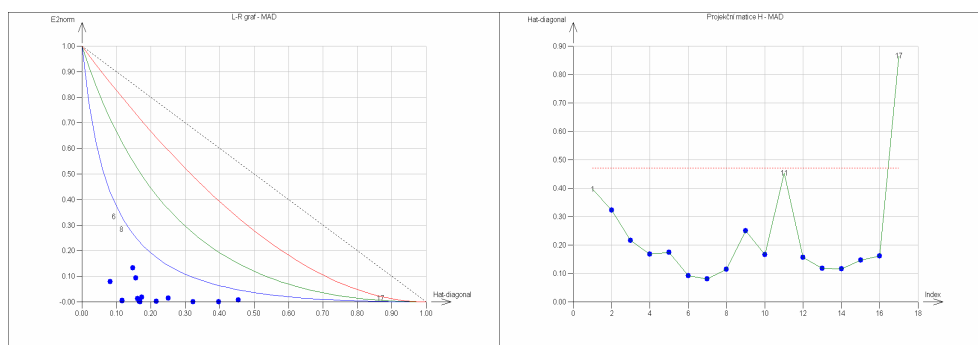


Příloha č. 9

Grafy č. 16: Grafická analýza modelu bez transformace průměrné absolutní odchylky MAD

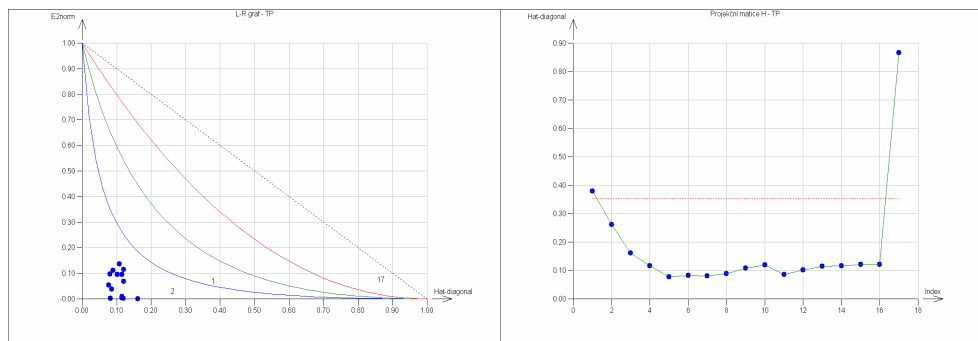


Grafy č. 17: Grafická analýza lineárního modelu průměrné absolutní odchylky MAD

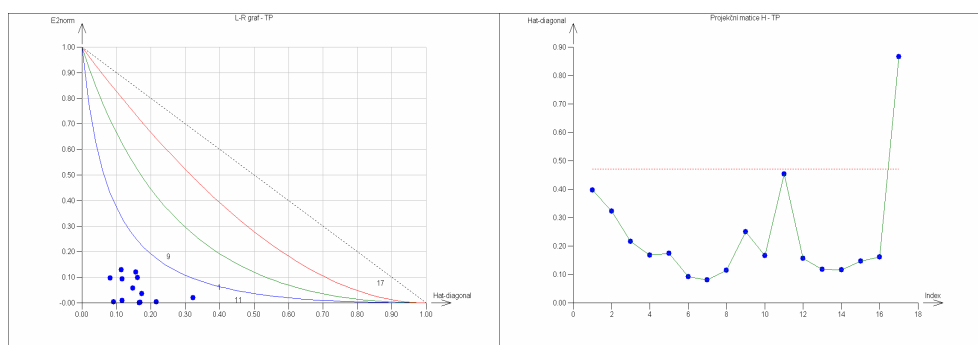


Příloha č. 10

Grafy č. 18: Grafická analýza modelu bez transformace desetibodového průměru TP



Grafy č. 19: Grafická analýza lineárního modelu desetibodového průměru TP



Příloha č. 11

Vzorek síťoviny s označením 130T

Vzorek síťoviny s označením 67M

Vzorek síťoviny s označením 35S

Vzorek síťoviny s označením 19M